

Automatització del càlcul i el disseny de subunitats de riego localizado en cultius hortícoles i parcel·les rectangulars.



**UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA
BARCELONATECH**

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona

Automatització del càlcul i el disseny de subunitats de reg localitzat en cultius hortícoles i parcel·les rectangulars.

Estudiant: Max Loizu Cisqueuella

Especialitat: Explotacions Agropecuàries

Tutors:

Ingrid Masaló Llorca

Carlos Gilarranz Casado

Escola Superior d'Agricultura de Barcelona
UPC – BarcelonaTech



RESUMEN

El presente trabajo expone el desarrollo y el funcionamiento de un software dirigido a los agricultores y a ingenieros agrícolas que tengan que poner en marcha el sistema de riego por goteo de una explotación hortícola.

La función principal del software es elaborar, de forma automática, el diseño de las subunidades de riego localizado, respetando siempre las restricciones agronómicas impuestas por el cultivo y el entorno (suelo, agua, clima), así como los limitantes hidráulicos que imponen las normas UNE (Una Norma Española).

Los diseños elaborados por el software se intentan adaptar a la realidad del mercado, utilizando, como parte de los datos de entrada, las tuberías que comercializan los distintos fabricantes. Se contemplan una inmensa cantidad de posibilidades y eso permite obtener muchos modelos con notable variabilidad en sus características.

Los resultados en todos los casos probados (diferentes cultivos y situaciones) dan un porcentaje de suelo mojado superior al 95% del área que se pretende mojar, una profundidad del bulbo húmedo dentro del intervalo recomendado (para la absorción del agua por las raíces), solapamientos entre bulbos húmedos no inferiores al 10% y no superiores al 40%, tiempos de riego totales no superiores a la jornada de riego disponible y una presión de trabajo junto a velocidades del agua que no superan los valores límite (fijados para asegurar un funcionamiento durable y seguro.)

El objetivo principal es que los ingenieros puedan delegar al programa los cálculos y el diseño de las subunidades de riego, para centrar su labor en la elección de los modelos más adecuados (según la situación de la parcela) y en el diseño de la red de distribución (desde la bomba hasta las subunidades). Como objetivo a largo plazo, este software podría realizar el diseño completo de una instalación de riego, permitiendo su uso a los agricultores que no tengan conocimientos en hidráulica y/o en riego localizado.

RESUM

El present treball exposa el desenvolupament i el funcionament d'un software dirigit als agricultors i a enginyers agrícoles que hagin de posar en marxa el sistema de reg per goteig d'una explotació hortícola.

La funció principal del software és elaborar, de forma automàtica, el disseny de subunitats de reg localitzat, respectant sempre les restriccions agronòmiques imposades per el cultiu i l'entorn (sòl, clima, aigua), així com els limitants hidràulics que imposen les normes UNE (Una Norma Española).

Els dissenys elaborats per el software s'intenten adaptar a la realitat del mercat, utilitzant, com a part de les dades d'entrada, les tuberíes que comercialitzen els diferents fabricants. Es contemplen una immensa quantitat de possibilitats i això permet obtenir molts models amb notable variabilitat en les seves característiques.

Els resultats en tots els casos probats (diferents cultius i situacions) donen un percentatge de sòl mullat superior al 95% del àrea que es pretén mullar, una profunditat del bulb humit dintre del interval recomanat (per l'absorbcio d'aigua per les arrels), solapaments entre bulbs humids no inferiors al 10% i no superiors al 40%, temps de reg totals no superiors a la jornada de reg disponible i una pressió de treball junt a velocitats de l'aigua que no superen els valors límit (fixats per assegurar un funcionament segur i durable).

El objectiu principal és que els enginyers puguin delegar al programa els càlculs i el disseny de les subunitats de reg, per centrar la seva tasca en l'elecció dels models més adients (segons la situació de la parcel·la) i en el disseny de la xarxa de distribució (des de la bomba fins a les subunitats). Com a objectiu a llarg plaç, aquest software podria realitzar el disseny complet de una instal·lació de reg, permeten el seu ús als agricultors que no tinguin coneixements en hidràulica i/o en reg localitzat.

ABSTRACT

The present work describes the development and functioning of a software addressed to farmers and engineers that wish to implement a drip irrigation system in their agricultural exploitation.

The main role of this software is to elaborate, automatically, drip irrigation subunits design, respecting agronomic restrictions imposed by the crop and the environment under consideration (soil, water, climate), as well as the hydraulic restrictions imposed by Spanish standards UNE (Una Norma Española).

The designs achieved by this software intend to get adjusted to market's reality, using commercial pipes (provided by the different trading houses) as a part of the input. A huge number of possibilities are being contemplated which allows to obtain many models (designs) with a high variability concerning their characteristics.

In all situations that were tested during software's development (different crops and environments), results were satisfying, giving a soil wet percentage higher than 95% of what is intended, a wet bulb depth within the recommended interval (to allow a correct water absorption by crop's roots), wet bulbs' overlapping higher than 10% and lower than 40%, total irrigation times not higher than the available irrigation daytime and working pressures together with water speeds that never exceed the limit values (set to ensure a secure and durable functioning)

The main goal is to allow engineers to delegate drip irrigations subunits design and calculations to the software, in order to focus their task in selecting the best models (designs) for their situation but also in designing the water distribution network (from the pump to irrigation subunits). As a long-term goal, this software could elaborate the complete design of a drip irrigation system, allowing its use to farmers that do not possess the required knowledge in hydraulics and/or drip irrigation systems.

ÍNDICE

ÍNDICE DE FIGURAS	1
ÍNDICE DE TABLAS	3
TERMINOLOGÍA, SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS	4
1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 Contexto histórico	8
1.2 Programas de riego en el mercado	12
2. OBJETIVOS	14
3. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE.	15
3.1 Diferencias con los demás programas del mercado	15
3.2 Alcance del programa	16
3.3 Lenguaje de programación	17
3.4 Entorno de programación	18
4. BASE DE DATOS	19
4.1 Características agronómicas de los cultivos hortícolas	19
4.2 Tuberías comerciales	21
4.3 Coeficiente de corrección debido a la temperatura del agua	22
4.4 Coeficiente de uniformidad	23
4.5 Eficiencia de aplicación	24
5. ESTRUCTURA Y MÉTODOS DEL SOFTWARE	26
5.1 Estructura y funcionamiento general	26
5.2 Input del software	27
5.3 Metodología recomendada para la Prueba de Campo	28
5.4 Establecimiento del modelo de infiltración del agua en el suelo	28
5.5 Cálculo de las necesidades hídricas netas diarias de la planta	29

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

5.6 Cálculo de las necesidades hídricas reales diarias de la planta	34
5.7 Casuística general en la distribución de las plantas respecto a su morfología	36
5.8 Creación de modelos (bucle principal del programa)	38
5.9 Organización y filtración de modelos	52
5.10 Visualización de modelos	53
6. EJEMPLO DE APLICACIÓN: CULTIVO DE TOMATE EN UNA PARCELA DE 5HA.	55
6.1 Características del caso considerado.	55
6.2 Procedimiento de uso del programa (caso de aplicación)	56
7. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE.	72
8. PREVISIÓN DE FUTURO DEL SOFTWARE	74
8. CONCLUSIÓN	76
9. BIBLIOGRAFÍA	78

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución del volumen de agua usado por la agricultura. Años 2000-2015 (Fuente: INE, 2017).

Figura 2. Evolución del volumen de agua por los distintos grupos de cultivo. Años 2000-2015 (Fuente: INE, 2017).

Figura 3 Superficie en regadío de los distintos grupos de cultivo en España. Año 2017 (Fuente: MAPAMA).

Figura 4. Esquema de una subunidad de riego.

Figura 5. Esquema del funcionamiento general del programa.

Figura 6. Curvas de K_3 según el tipo de cultivo adyacente a la parcela (FAO, 1977).

Figura 7. Proceso de extracción de datos mediante AutoCAD.

Figura 8. Regresión logarítmica de los datos de k_3 – gramíneas.

Figura 9. Regresión logarítmica de los datos de k_3 – árboles.

Figura 10. Regresión logarítmica de los datos de k_3 - maíz.

Figura 11. Esquema del caso genérico 1.

Figura 12. Esquema del caso genérico 2.

Figura 13. Esquema del caso genérico 3.

Figura 14. Esquema del proceso de creación de modelos.

Figura 15. Influencia del marco de riego en los solapamientos según el diámetro mojado por los emisores.

Figura 16. Solapamiento entre emisores de riego.

Figura 17. Esquema del bucle iterativo para el cálculo de la longitud máxima de la terciaria.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Figura 18. Fase 1 del programa.

Figura 19. Fase 1.1: Selección del grupo de cultivos..

Figura 20. Fase 1.2

Figura 21. Fase 1.3: Selección del cultivo deseado.

Figura 22. Fase 1.4: Primera adquisición de datos.

Figura 23. Fase 2: Segunda adquisición de datos.

Figura 24. Fase 3.1: Inserción de los datos obtenidos con el primer caudal de la prueba de campo ($q = 1,6 \text{ L.h}^{-1}$).

Figura 25. Fase 3.2: Inserción de los datos obtenidos con el segundo caudal de la prueba de campo ($q = 2,2 \text{ L.h}^{-1}$).

Figura 26. Fase 3.3: Inserción de los datos obtenidos con el tercer caudal de la prueba de campo ($q = 4,0 \text{ L.h}^{-1}$).

Figura 27. Fase 4: Cálculo y diseño de modelos.

Figura 28. Fase 5.1: Visualización de los grupos de modelos obtenidos.

Figura 29. Fase 5.2: Herramientas de organización para los modelos de un grupo dado.

Figura 30. Fase 5.3: Elección de un modelo para su visualización.

Figura 31. Fase 5.4: Visualización de las características principales del modelo.

Figura 32. Fase 6.1: Elección de un modelo para su re-ajuste.

Figura 33. Fase 6.2: Ajuste de la longitud del lateral.

Figura 34. Fase 6.3: Restablecimiento de la longitud máxima de la terciaria y ajuste de su longitud.

Figura 35. Fase 6.4: Visualización de un modelo después de su modificación.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Eficiencia de los principales sistemas de riego (Fuente: FAO, 1989).

Tabla 2. Tipos de regadío en España. Año 2017 (Fuente: MAPAMA, 2017)).

Tabla 3. Evolución de la superficie regada según tipos de riego. Años 2007-2017 (Fuente: MAPAMA, 2017).

Tabla 4. Características de los cultivos. (Fuente: FAO y UPM).

Tabla 5. Características de las tuberías comerciales para micro-riego.

Tabla 6. Valores del coeficiente C.

Tabla 7. Coeficiente de Uniformidad Teórico según el tipo de clima, el espaciamiento entre emisores y la pendiente del terreno (Arviza, 1996).

Tabla 8. Valores de la Eficiencia de Aplicación en climas húmedos (Arviza, 1996).

Tabla 9. Valores de la Eficiencia de Aplicación en climas húmedos (Arviza, 1996).

Tabla 10. Datos extraídos de las curvas de k_3 .

Tabla 11. Parámetros principales de un modelo.

Tabla 12. Parámetros secundarios de un modelo.

Tabla 13. Restricciones agronómicas en la función `SetLateralSeparations`.

Tabla 14. Restricciones agronómicas en la función `SetDripSeparations`.

Tabla 15. Método de cálculo de la superficie mojada (S_m) según la situación.

Tabla 16. Espesor de las tuberías de PE de micro riego según DN y PN (Fuente: UNE, 2017).

Tabla 17. Espesores de las tuberías de PE para la conducción de aguas, según DN y PN (Fuente: UNE, 2014).

Tabla 18. Prueba de Campo utilizada en el ejemplo de aplicación.

Tabla 19. Características del cultivo de tomate.

TERMINOLOGÍA, SÍMBOLOS Y ACRÓNIMOS

Terminología

- Bulbo húmedo: Se define como la forma tridimensional o bidimensional que toma la zona mojada por un emisor de riego. Ésta suele ser ovalada o aplastada, según el tipo de suelo (según su porosidad y su composición), es decir en forma de elipsoide o esferoide.
- Diámetro aéreo del cultivo: Se define como el círculo teórico que representa la proyección de la planta en el suelo, y viene dado por el tamaño y la densidad de follaje de ésta.
- Diámetro Nominal (DN): El diámetro nominal corresponde al diámetro exterior de una tubería.
- Emisores integrados: Son goteros que vienen integrados en la tubería (no se pueden insertar una vez fabricada la tubería). Son de tipo laberinto, es decir que, antes de dejar salir el agua, obligan a hacerla recorrer una distancia adicional. Este tipo de goteros son los que se usan en este programa, por el momento (goteros integrados autocompensantes).
- Emisores de riego autocompensantes: Son goteros que están diseñados para arrojar el mismo caudal dentro de un rango de presiones determinado.
- Evapotranspiración de referencia (ET_0): Es la medida de la evaporación de agua en el suelo y de la transpiración de un cultivo determinado (de referencia). Su valor varía según las condiciones climáticas (temperatura, humedad relativa y viento, principalmente).
- Intervalo entre riegos: Corresponde al tiempo que transcurre entre cada riego.
- Jornada de riego disponible: Se define como las horas diarias de las que se dispone de agua y/o electricidad para regar.
- Marco de plantación: Viene dado por la distribución de las plantas, concretamente por la separación entre plantas (a) y la separación entre líneas de plantas (b).
- Pérdidas de Carga: Cuantificación de la variación de presión en el fluido debido a la fricción de este con las paredes internas de la tubería, a la fricción con los accesorios de la instalación y a la variación de altura (desnivel).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

- Porcentaje de suelo mojado (P_m): Representa la porción de suelo que se moja respecto al área que se pretende mojar.
- Presión Nominal (PN): Se define como la presión máxima a la que puede someterse una tubería y viene determinada por las normas UNE.
- Presión de Trabajo (P_t): Es la presión necesaria al inicio de la terciaria para que la subunidad de riego funcione como previsto.
- Prueba de Campo: Es una prueba que se realiza en el terreno donde se pretende cultivar, con el objetivo de determinar un modelo de la infiltración del agua en el suelo, en función del tiempo y del caudal medio del emisor.
- Sector o posición de riego: Área que se riega de forma simultánea. Se compone de una o más subunidades y se caracteriza por tener una válvula hidráulica en su punto inicial, para poder controlar cuando riega.
- Subunidad de riego: Se define como la unidad más pequeña de riego y se compone de una tubería terciaria y diversas tuberías laterales (que son las que portan los emisores de riego). Una subunidad de riego representa la superficie mínima de terreno que regamos de forma simultánea (puede haber más de una subunidad regando al mismo tiempo, pero nunca menos). Las características principales (a efectos de instalación y funcionamiento) son: longitud de las tuberías (terciaria y laterales), separación entre emisores y entre laterales, caudal medio de los emisores (y caudal total) y presión de trabajo (presión al inicio de la terciaria).

Símbolos

D_m : Diámetro mojado por un emisor de riego (m)

D_a : Diámetro aéreo del cultivo (m)

DN : Diámetro nominal de una tubería (mm)

D_i : Diámetro interior de una tubería (mm)

e : Espesor de una tubería (mm)

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

S_e : Separación entre emisores de riego del mismo lateral (m)

S_{lat} : Separación entre laterales de riego (m)

L_{lat} : Longitud de los laterales (m)

L_{terc} : Longitud de la terciaria (m)

h_l : Pérdidas de carga lineales (mca)

h_s : Pérdidas de carga singulares (mca)

h_{tot} : Pérdidas de carga totales (mca)

P_0 : Presión al inicio de la tubería (mca)

P_{min} : Presión mínima requerida en los laterales (mca)

q_e : Caudal medio de los emisores ($L \cdot h^{-1}$)

n_e : Número de emisores por planta (emisores.planta⁻¹)

n_{lat} : Número de laterales en la subunidad

NT_n : Necesidades hídricas netas diarias de la planta (mm.día⁻¹)

NT_r : Necesidades hídricas totales diarias de la planta (mm.día⁻¹)

P_m : Porcentaje de suelo mojado por los emisores (%)

A_m : Área que se pretende mojar (m²)

S_m : Superficie mojada por un emisor (m²)

A_{se} : Área solapada entre emisores del mismo lateral (m²)

A_{le} : Área solapada entre emisores de laterales contiguos (m²)

A_θ : Área del segmento circular (m²)

a : Separación entre plantas (m)

b : Separación entre líneas (m)

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Acrónimos

- API : Application Programming Interface.
- CAD : Computer-aided design.
- FAO : Food and Agriculture Organization.
- IDE : Integrated Development Environment.
- INE : Instituto Nacional de Estadística.
- MAPAMA : Ministerio de Agricultura Pesca Alimentación Medioambiente.
- PE : Polietileno.
- PEBD : Polietileno de Baja Densidad.
- UNE : Una Norma Española.

1. INTRODUCCIÓN

1.1 Contexto histórico

Como es bien sabido, el agua es un recurso natural cada vez más escaso (sobre todo en las zonas más áridas del planeta). La aparición y el uso del regadío han permitido un incremento en la calidad de los cultivos, en su rendimiento y en la continuidad de su producción. Sin embargo, con el aumento de la población, el uso de agua para la agricultura, en términos absolutos, ha aumentado drásticamente. En muchos países el sistema de riego más utilizado es el tradicional (por gravedad), siendo el más ineficiente.

Los principales sistemas de riego son los siguientes:

Tabla 1. Eficiencia de los principales sistemas de riego (Fuente: FAO, 1989)

Sistema de Riego	Eficiencia de riego (%)
Gravedad (surcos)	60
Aspersión	75
Goteo/Localizado	90

En España, durante los últimos 20 años, el riego localizado se ha ido imponiendo por encima de los demás tipos de sistemas de regadío. Según el Ministerio de Agricultura, Pesca, Alimentación y Medioambiente (MAPAMA, 2017), en el año 2017, el riego localizado representaba el 51,37% de la superficie en regadío, mientras que el riego por aspersión y el riego por gravedad representaban el 15,28% y el 24,82%, respectivamente (tabla 2). Esto ha llevado a un aumento general en la eficiencia en el uso del agua, lo que ha permitido que el volumen de agua total utilizado haya disminuido al mismo tiempo que la superficie total de regadíos ha aumentado. Según el Instituto Nacional de Estadística (INE, 2017), en el año 2000 el volumen de agua utilizado por la agricultura fue de 16.897hm³ mientras que en 2015 fue de 14.945hm³ (figura 1). La tendencia está siendo un aumento del riego por goteo, por aspersión y el automatizado (siendo superior el crecimiento del primero) en detrimento del riego por gravedad (tabla 3).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Tabla 2. Tipos de regadío en España. Año 2017 (Fuente: MAPAMA, 2017))

Tipos de Regadío	Superficie ha	Superficie %
	Ha	%
Gravedad	926.748	24,82%
Aspersión	570.360	15,28%
Automotriz	318.695	8,54%
Localizado	1.917.892	51,37%
Sin información y otros		
TOTAL	3.733.695	100,00%

Tabla 3. Evolución de la superficie regada según tipos de riego. Años 2007-2017 (Fuente: MAPAMA, 2017)

Tipos de Regadío	Superficie (ha)											Variaciones (%)	
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2017/16	2017/Prom. 07-16
Gravedad	1.115.271	1.082.604	1.064.248	1.043.704	1.031.669	1.020.245	1.004.782	986.463	978.264	943.203	926.748	-1,74%	-9,77%
Aspersión	464.619	469.868	479.697	470.758	497.794	541.150	529.215	557.935	558.834	549.668	570.360	3,76%	11,41%
Automotriz	250.483	257.654	265.897	262.161	284.714	297.149	298.169	304.254	306.272	311.676	318.695	2,25%	12,28%
Localizado	1.502.327	1.548.043	1.591.616	1.628.705	1.658.317	1.662.847	1.707.576	1.756.139	1.792.985	1.850.869	1.917.892	3,62%	14,85%
Otros Sistemas y sin información	28.082	16.463	19.847	2.625	979	1.225	816	330	164				-100,00%
TOTAL	3.360.782	3.374.632	3.421.305	3.407.953	3.473.474	3.522.615	3.540.560	3.605.121	3.636.519	3.655.417	3.733.695	2,14%	6,68%

Normalmente la elección entre un sistema de riego u otro depende del cultivo que se pretende implantar (según la morfología y fisiología de la planta) aunque también influyen el factor económico y los condicionantes del entorno (suelo, clima, topografía de la parcela, distribución de las plantas...). Sin embargo, de manera general, el riego localizado es actualmente el sistema más adaptado y eficiente (exceptuando el riego subterráneo).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

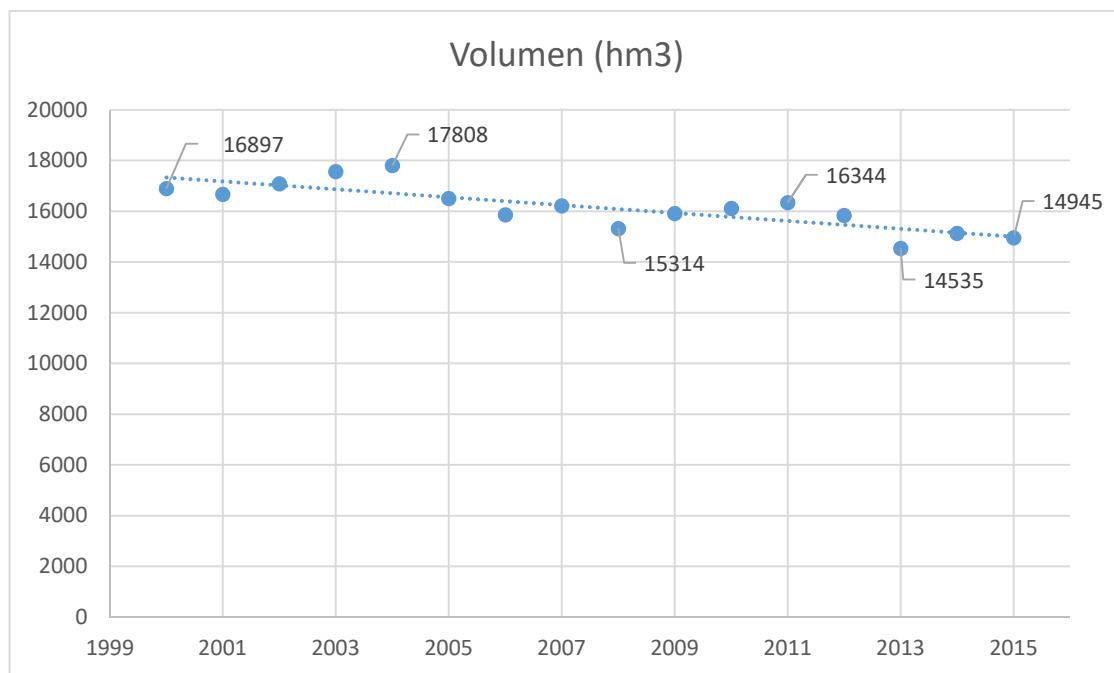


Figura 1. Evolución del volumen de agua usado por la agricultura. Años 2000-2015 (Fuente: INE, 2017)

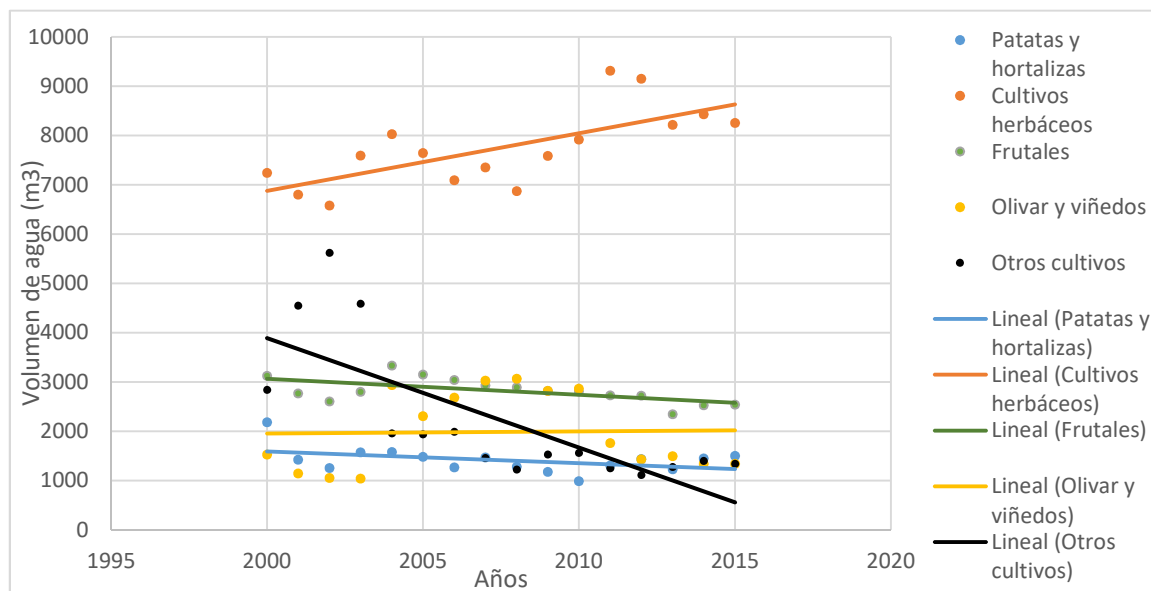


Figura 2. Evolución del volumen de agua por los distintos grupos de cultivo.. Años 2000-2015 (Fuente: INE, 2017)

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Como se puede observar en la figura 2, el grupo de cultivos que representa el mayor gasto de agua es el de los cultivos herbáceos (cereales, legumbres y forrajeras), siendo también el grupo que ocupa la mayor superficie de regadío (figura 3). La tendencia al alza del agua usada por los cultivos herbáceos se debe principalmente al aumento de la superficie cultivada.

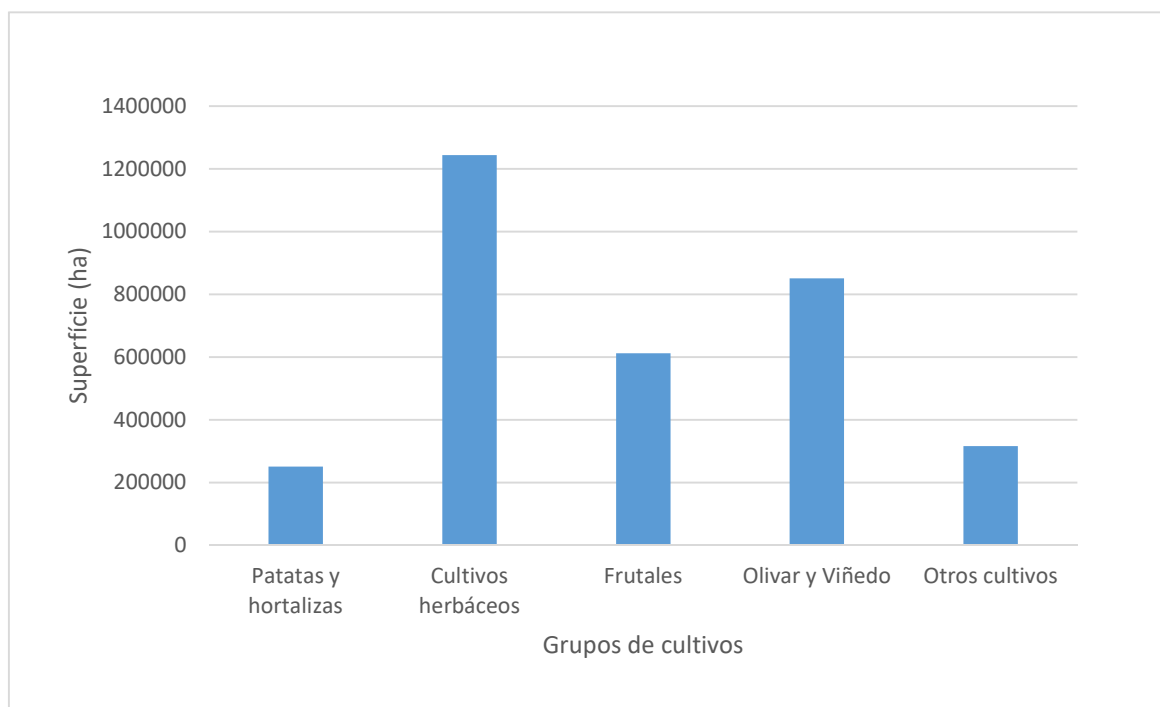


Figura 3. Superficie en regadío de los distintos grupos de cultivo en España. Año 2017 (Fuente: MAPAMA, 2017)

La principal desventaja del riego localizado para cultivos anuales (herbáceos y hortalizas principalmente) es que, al usar tuberías de polietileno de baja densidad (PEBD) para regar, es necesario renovarlas cada año o cada dos, ya que se desgastan fácilmente y son muy susceptibles a daños mecánicos (animales, maquinaria, herramientas...). Es por ello que el diseño de la subunidad de riego es especialmente importante, pues si se reduce la cantidad de material (tuberías) en la instalación, se consiguen reducir los gastos y el uso de materiales en cada renovación de las tuberías porta-emisores.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

1.2 Programas de riego en el mercado

Actualmente existen numerosos programas que facilitan el cálculo y/o el diseño de instalaciones de riego. Se han agrupado los principales programas en 4 grupos:

- **Calculadoras hidráulicas:** Son softwares proporcionados por las casas comerciales que venden las tuberías porta emisores. Sirven para elegir un modelo de tubería adecuado para la situación en que se encuentre el usuario (pendiente de la parcela, separación entre emisores, caudal de los emisores...). Estos softwares calculan las pérdidas de carga de una tubería y para una situación dada, determinando así la presión y la velocidad del agua al inicio de ésta. De este grupo, el software más completo es *NaanDanJain Irrigation Systems*.
- **Calculadoras agronómicas:** Que se haya podido constatar, solo existe un programa de este tipo y se llama *Agronomy Calculus*. Es una herramienta de cálculo que agiliza el cálculo de algunos parámetros agronómicos (horas de riego al día, tiempo por cada riego, caudal total de la subunidad, área por sector...). No es un software demasiado útil, ya que los cálculos que realiza son sencillos y no conllevan ningún razonamiento implícito: los datos de entrada que usa son los resultantes del diseño agronómico (que, por ende, deberá hacerse previo al uso del programa) y los cálculos realizados proporcionan datos que sirven como criterio último en la toma de decisiones.
- **Diseño de redes:** El principal programa que trabaja esta cuestión es Epanet, proporcionado por la Agencia de Protección Ambiental de Estados Unidos. Su funcionalidad principal es asistir en el diseño de redes de distribución de agua, dando la posibilidad de modificar la posición de cada elemento (tuberías, válvulas, bomba...) y de ajustar sus características. También realiza el dimensionado de las tuberías (diámetro nominal, espesor y material), de forma automática.
- **Programas CAD:** El programa más conocido y utilizado es *IRRICAD – Irrigation Design Software*. Al igual que AutoCAD, es un software de diseño asistido por computadora (CAD, por sus siglas en inglés). Trabaja con archivos “.dwg” y “.dxf” que son formatos vectoriales. Se puede dibujar con facilidad y diseñar a escala, teniendo numerosas herramientas para ello. IrriCAD, además de proporcionar herramientas de dibujo contiene una base de datos de tuberías comerciales. A medida que el usuario va dibujando, el programa dimensiona las

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

tuberías según los parámetros de entrada (caudal de los emisores, separación entre emisores, separación entre laterales, pendiente...). Es un software muy útil pero que requiere de conocimiento en hidráulica, agronomía del riego y otros conocimientos.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

2. OBJETIVOS

Hoy en día los programas de riego existentes están enfocados únicamente a ingenieros, ya que los agricultores no suelen tener los conocimientos necesarios para su utilización. Es por ello que se pretende, a largo plazo, elaborar un programa que sea una herramienta fácil de utilizar para personas con pocos conocimientos en hidráulica, agronomía del riego u otros, con el objetivo de facilitar e incentivar la implementación del riego localizado.

Dado que automatizar el diseño completo de una instalación de riego (desde la bomba hasta los emisores de riego) es una tarea complicada, se decidió empezar por el diseño de subunidades de riego, que es la primera fase del diseño de una instalación. De esta manera, se simplifica el planteamiento para poder centrar los esfuerzos en la elaboración del código del programa.

A nivel técnico, el objetivo es optimizar el diseño del riego localizado de riego, teniendo en cuenta todas las posibilidades (que variarán según la información disponible: la base de datos y el input del usuario) y siguiendo los criterios hidráulicos que imponen las normas UNE, así como los criterios agronómicos basados en la literatura existente.

De forma general, el objetivo de este trabajo no es elaborar un software perfectamente funcional, sino intentar demostrar que es viable automatizar por completo el diseño de instalaciones de riego localizado (y por tanto el de otros tipo de riego), siendo entonces la base para elaborar un programa completo.

3. CARACTERÍSTICAS DEL SOFTWARE

3.1. Diferencias con los demás programas del mercado

El software que se pretende elaborar debe realizar el diseño de subunidades de forma automática (el usuario solo puede modificar los parámetros de entrada y organizar los modelos calculados para elegir el “óptimo”). Esto significa tener que aplicar, por una parte, fórmulas hidráulicas que no tienen gran complicación (en cuanto a traducirlas a código). Por otra parte, es necesario traducir los cálculos agronómicos y el razonamiento implícito en el diseño (siendo este mucho más difícil de trasladar a código). Ese razonamiento es lo que más caracteriza a este programa, ya que es el único que posee esta funcionalidad.

Los cálculos y la mayor parte del razonamiento se basan en la literatura existente de agronomía e hidráulica. Sin embargo, fue necesario realizar un pequeño estudio a partir de AutoCAD para establecer la casuística general con relación a la distribución de las plantas respecto a su tamaño. De esta manera se traslada un razonamiento, que suele hacerse de manera intuitiva y/o por experiencia (sin recurrir a cálculos), a un cálculo simple para poder sistematizar por completo el diseño de las subunidades de riego.

En el siguiente esquema se muestra como es exactamente una subunidad de riego, que es lo que el programa debe conseguir diseñar y calcular:

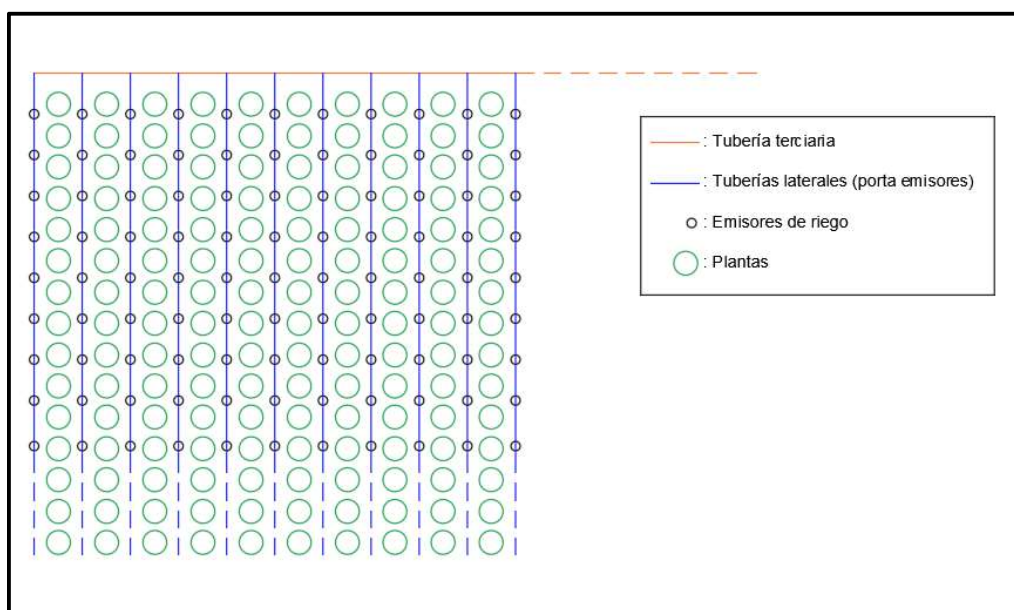


Figura 4. Esquema de una subunidad de riego.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

3.2 Alcance del programa

Por ahora el software cuenta con una base de datos que incluye, entre otras cosas, las tuberías estándar de las diferentes casas comerciales con distribuidor en España. Si bien varias de ellas tienen distribuidores en muchos países, no se ha podido abarcar tal cantidad de datos por una cuestión de tiempo.

Para facilitar el desarrollo del programa, se estableció que solo funcione para casos con las siguientes características:

- Cultivo(s) hortícola(s), tubérculos y legumbres.
- Parcela(s) rectangular(es).
- Pendiente uniforme.
- Riego localizado con emisores autocompensantes.

Las tuberías que hay en el mercado vienen en bobinas de longitudes estándar (yendo desde 25 hasta 500m normalmente). Además, existen muchísimas tuberías con características diferentes a parte de la longitud (caudal del emisor, rango de presiones del emisor, diámetro nominal y espesor), por lo que se acaban teniendo suficientes modelos.

Otro limitante respecto a la información de las tuberías comerciales es que no se dispone del precio de éstas. Ello se debe a que las casas comerciales fijan un precio en función del volumen del pedido, pues, como se ha mencionado hace un momento, las tuberías van en bobinas, que a su vez van en contenedores, de tamaño estándar. Esto implica que, a la hora de filtrar los modelos, no se puede tener en cuenta el precio de éstos y por tanto no puede existir una valoración económica de los mismos. Sin embargo, es obvio que, a mayor diámetro y espesor de la tubería (para un mismo tipo de material), el precio será también mayor.

3.3 Lenguaje de programación

Los lenguajes de programación se suelen clasificar de mayor a menor proximidad respecto al lenguaje humano. El lenguaje de más bajo nivel es el binario, siendo el lenguaje máquina, y el de mayor nivel es el lenguaje humano. Cuanto más cerca esté un lenguaje de programación del lenguaje máquina, más libertad se tendrá para operar, pero la complejidad se verá incrementada. Por ejemplo, Python (lenguaje de alto nivel) no permite acceder a las direcciones de memoria de las variables (a diferencia de C++ y otros lenguajes de menor nivel). Sin embargo, tener acceso a direcciones de memoria implica una responsabilidad, ya que una mala gestión puede dar muchos problemas (Stroustrup, 2013).

Para este software, se decidió utilizar el lenguaje C++. Es un lenguaje de nivel medio, es decir que está más o menos equidistante del lenguaje humano y del lenguaje máquina. La elección de este lenguaje de programación se debe principalmente a los siguientes aspectos:

- Estructuración del código: en C / C++ aparece por primera vez el concepto de “clase” (*class* en inglés), que suele llamarse también objeto o entidad. Este tipo de estructura permite almacenar todo tipo de datos y al mismo tiempo puede contener métodos (funciones). Esto es muy útil para separar y organizar el código, haciéndolo más inteligible y coherente.
- Gestión de la memoria dinámica: durante la ejecución de un programa, toda la información existente y necesaria para su funcionamiento se localiza temporalmente en la memoria RAM del dispositivo. En C, C++ y Pascal, la memoria se divide en dos partes: “*stack*” y “*heap*”, que son estructuras de datos. El *stack* opera con el sistema LIFO (*last in first out*) y su tamaño es fijo. Por el contrario, el *heap* no tiene tamaño fijo (es dinámico) y su gestión no es ordenada: la memoria no es continua, por lo que la información de un mismo elemento (de un objeto, por ejemplo) no tiene por qué estar localizada en un único bloque de memoria. Cuando se programa en C++ hay que controlar el flujo del *heap* siempre y cuando hayamos almacenado memoria de forma dinámica. Aunque esto puede ser un problema, también puede ser también una ventaja si maneja correctamente ya que, a diferencia del *stack*, el *heap* puede reducir su tamaño (además de incrementarlo). Esto significa que se puede eliminar información durante la

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

ejecución del programa (si ésta ya no es necesaria), lo que resulta muy útil cuando se maneja una gran cantidad de datos.

- Privacidad y seguridad: C++ proporciona, a través de los conceptos “*const*” (constante) y “*private*” (privado), una manera de proteger las variables del programa, para que no se puedan modificar en ningún momento desde fuera (solo se pueden modificar desde el código fuente, fuera del tiempo de ejecución).
- Optimización: en este lenguaje también aparece por primera vez otro concepto, denominado “*pointer*” (puntero). Los punteros en realidad poseen una única información: la dirección de memoria de otro elemento (ubicado en el *heap*). Se localizan en el *stack* y, al igual que todo elemento almacenado en la memoria, tiene también una dirección de memoria. Esto es extremadamente útil ya que durante la ejecución del programa se usa una misma información múltiples veces, por lo que, si se tuviera que copiar esa información a cada vez, el *stack* acabaría llenándose y se perdería información. Con los punteros se puede acceder a la información de un elemento sin necesidad de copiarlo.
- Funcionalidades: C++ proporciona librerías de todo tipo (como la mayoría de lenguajes). La principal librería se denomina “*std*” (*standard library*) y contiene un buen número de estructuras de datos (*vector*, *string*, *map*, *pair*, *array*, *struct*...), cada una con propiedades y funcionalidades distintas. También hay librerías de matemáticas como “*math.h*” que proporcionan funciones de cálculo (*sinus*, *cosinus*, *potencias*, ...).

3.4 Entorno de programación

Para la elaboración del software se decidió utilizar Microsoft Visual Studio 2015 (VS) como entorno IDE (*Integrated Development Environment*). Este programa se compone de diferentes paquetes, cada uno para un lenguaje de programación diferente. En este caso solo se ha usado el paquete de C/C++. Visual Studio tiene su propio compilador para cada lenguaje y, además, posee un sistema de ayuda denominado *IntelliSense*, que facilita mucho el hecho de escribir código. También posee un sistema de detección y clasificación de errores que resulta muy útil.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

4. BASE DE DATOS

4.1 Características agronómicas de los cultivos hortícolas

En el diseño de una instalación de riego, las restricciones con más peso se deben a las características del cultivo que se quiere implantar. Los parámetros de interés de los cultivos son, a nivel de diseño agronómico, la morfología de la planta, sus necesidades hídricas y su tolerancia a la salinidad. Así, este software incluye la siguiente información:

Tabla 4. Características de los cultivos. (Fuente: FAO)

Cultivo	Profundidad radicular (Dr), en m	Diámetro aéreo (Da), en m	Coeficiente de cultivo (Kc)	Conductividad eléctrica máxima del extracto saturado del suelo (CE _{es}), en mmhos.cm ⁻¹ o dS.m ⁻¹
Ajo	0.25	0.15	1.00	3.90
Alcachofa	0.50	0.75	1.00	6.10
Apio	0.35	0.30	1.05	1.80
Batata	0.50	0.60	1.15	1.50
Berenjena	0.40	0.60	1.05	1.10
Brócoli	0.35	0.50	1.05	2.80
Cacahuete	0.40	0.55	1.15	3.20
Calabacín	0.40	0.55	1.05	4.70
Calabaza	0.50	0.75	1.00	1.20
Cebolla grano	0.25	0.30	1.05	1.20
Cebolla seca	0.25	0.30	1.05	1.20
Cebolla verde	0.25	0.35	1.00	1.20
Chirivía	0.35	0.35	1.05	1.00
Col (Repollo)	0.30	0.50	1.05	1.80
Col de Bruselas	0.30	0.45	1.05	2.30
Coliflor	0.35	0.50	1.05	1.80

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Cultivo	Profundidad radicular (Dr), en m	Diámetro aéreo (Da), en m	Coefficiente de cultivo (Kc)	Conductividad eléctrica máxima del extracto saturado del suelo (CE _{es}), en mmhos.cm ⁻¹ o dS.m ⁻¹
Espárrago	0.50	0.45	0.95	5.50
Espinaca	0.25	0.20	1.00	2.00
Fresa	0.25	0.25	0.85	1.00
Garbanzo	0.40	0.45	1.00	1.50
Guisante grano	0.35	0.45	1.15	1.50
Guisante verde	0.40	0.40	1.15	1,50
Haba grano	0.40	0.45	1.15	1.50
Haba verde	0.40	0.45	1.15	1.50
Judía china	0.40	0.40	1.05	4.90
Judía grano	0.40	0.40	1.15	1.00
Judía verde	0.40	0.45	1.00	1.50
Lechuga	0.35	0.45	1.00	1.25
Lenteja	0.40	0.45	1.10	3.00
Melón	0.50	0.75	1.05	1.70
Menta	0.25	0.30	1.15	1.00
Patata	0.45	0.55	1.15	1.70
Pepino	0.30	0.40	1.10	2.00
Pimiento	0.40	0.55	1.10	1.50
Rábano	0.20	0.20	0.90	1.20
Remolacha	0.45	0.35	1.05	4.00
Remolacha azucarera	0.45	0.30	1.20	7.00
Sandía	0.40	0.70	1.00	0.90
Tomate	0.45	0.60	1.20	2.00
Zanahoria	0.35	0.40	1.05	1.00

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Hay cultivos que no se han incorporado debido a que no se encontró toda la información necesaria (los cuatro parámetros aquí contemplados). La profundidad radicular de los cultivos, en riego localizado, se limita a un máximo de 50cm, ya que los caudales bajos (usados en este tipo de sistema de riego) dan lugar a bulbos húmedos de pequeño tamaño.

El parámetro K_c (coeficiente de cultivo) y CE_{es} se usan para el cálculo de las necesidades hídricas de la planta (como se verá más adelante) y se extrajeron del estudio de la FAO (Allen et al., 1998).

Respecto al diámetro aéreo (D_a) de los cultivos, no ha sido posible encontrar estudios en los que se haya determinado su valor medio para cada especie. Es por ello que se han asignado valores a D_a en base a la profundidad radicular y contrastando con distintas fotografías de cada cultivo. Por esta razón se otorga al usuario la posibilidad de introducir el diámetro aéreo de su cultivo, en caso de conocerlo bien.

4.2 Tuberías comerciales

Por ahora el programa incluye tuberías de las siguientes marcas: CEPEX, AZUD, Naandanjain y RainBird. Solo se han incorporado los catálogos de tuberías con goteros autocompensantes. Esto se debe a dos razones: por un lado, se priorizó tener una cantidad considerable de tuberías diferentes (hay alrededor de 450 incluidas en el software) pero con el mismo tipo de gotero, dado que la lógica del cálculo hidráulico es diferente cuando los goteros son autocompensantes. Por otro lado, los catálogos de tuberías con goteros no autocompensantes no siempre están completos en lo que se refiere a datos técnicos (necesarios para el cálculo y diseño hidráulicos). Aun así, el programa está preparado para realizar el cálculo en las dos situaciones, pero por ahora no dispone de los catálogos de tuberías con goteros no autocompensantes.

A continuación, se muestra un ejemplo de las características de las tuberías con goteros autocompensantes:

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Tabla 5. Características de las tuberías comerciales para micro-riego.

Marca	Diámetro Nominal (DN), en mm	Diámetro Interior (Di), en mm	Longitud de la bobina, en m	Separación entre emisores, en m	Caudal de los emisores, en L · h ⁻¹	Presión mínima de trabajo, en mca	Presión máxima de trabajo, en mca
CEPEX	16.0	13.6	50	0.35	2.2	10.0	40.0
RainBird	16.1	13.6	100	0.50	1.6	5.9	41.4
AZUD	16.0	13.8	300	0.75	1.0	5.0	40.0
NaanDanjain	15.7	13.9	400	1.00	1.2	5.0	30.0

4.3 Coeficiente de corrección debido a la temperatura del agua

En los cálculos hidráulicos del programa, se usa la ecuación de Blassius para calcular las pérdidas de carga lineales (h_l) en la tubería. Esta fórmula es adecuada para tuberías lisas de polietileno (PE). En la ecuación (1) aparece el término “C” que corresponde al coeficiente de corrección debido a la temperatura del agua. Su valor depende pues de la temperatura del agua y se extrae de la siguiente tabla:

Tabla 6. Valores del coeficiente C

T(°C)	C
5	0.516
10	0.496
15	0.479
20	0.464
25	0.45
30	0.437
35	0.426
40	0.416
45	0.406
50	0.397

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

$$h_l = C \cdot L \cdot \frac{Q^{1,75}}{D_i^{4,75}} \quad (1)$$

Dónde:

- h_l son las pérdidas de carga lineales (en mca).
- L es la longitud de la tubería (en m).
- Q es el caudal (en L.h⁻¹).
- D_i es el diámetro interior de la tubería (en mm).

4.4 Coeficiente de Uniformidad

El coeficiente de uniformidad (CU o UE) mide la uniformidad en la distribución del agua. Dicho de otra manera, mide la diferencia máxima que puede darse entre el caudal arrojado por los distintos emisores de una misma subunidad. Dado que el software solo opera a partir de tuberías con emisores autocompensantes, se asume que CU = 1 debido a que la variación de caudales, dentro del rango de presiones establecido por el fabricante, es despreciable. Como veremos más adelante, el valor de CU es imprescindible para el cálculo de las necesidades hídricas de la planta, si bien en este caso no influirá puesto que CU = 1.

En el caso de que el software operara también a partir de tuberías con goteros turbulentos, sería necesario establecer, en un primer momento, un valor teórico a CU. Para ello, se dispone de esta tabla como orientación:

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Tabla 7. Coeficiente de Uniformidad Teórico según el tipo de clima, el espaciamiento entre emisores y la pendiente del terreno (Arviza, 1996)

Emisores	Pendiente	Clima árido	Clima húmedo
Espaciados menos de 2,5m en cultivos permanentes o semipermanentes	Uniforme (<2%)	0.85-0.90	0.75-0.80
	Uniforme (>2%) u ondulada	0.80-0.90	0.70-0.80
Espaciados menos de 2,5m en cultivos permanentes o semipermanentes	Uniforme (<2%)	0.85-0.90	0.75-0.80
	Uniforme (>2%) u ondulada	0.80-0.90	0.70-0.80
Tuberías porosas en cultivos anuales	Uniforme (<2%)	0.80-0.90	0.70-0.80
	Uniforme (>2%) u ondulada	0.70-0.85	0.65-0.75

Al encontrarnos en cultivos hortícolas, la separación entre emisores nunca será mayor de 2,5m. Tampoco se contempla el riego con tuberías porosas en este software por lo que quedan descartados dos de los tres casos generales.

Una vez se haya diseñado un modelo de subunidad, se calculará su valor “real” a partir de la presión mínima en la subunidad y se comprobará que no sea inferior al teórico.

4.5 Eficiencia de Aplicación

La eficiencia de aplicación también es un parámetro necesario para calcular las necesidades hídricas de la planta. Esta mide el grado de aprovechamiento del agua por la planta, es decir que mide la cantidad de agua que absorbe la planta frente a la que recibe. Su valor se determina a partir de estas dos tablas:

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

a) Climas áridos:

Tabla 8. Valores de la Eficiencia de Aplicación en climas húmedos (Arviza, 1996)

Profundidad radicular (cm)	Textura del suelo			
	Gravosa	Gruesa	Media	Fina
< 75	0.85	0.90	0.95	0.95
75 a 150	0.90	0.90	0.95	1.00
>150	0.95	0.95	1.00	1.00

b) Climas húmedos:

Tabla 9. Valores de la Eficiencia de Aplicación en climas húmedos (Arviza, 1996)

Profundidad radicular (cm)	Textura del suelo			
	Gravosa	Gruesa	Media	Fina
< 75	0.65	0.75	0.85	0.90
75 a 150	0.75	0.80	0.90	0.95

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

5. ESTRUCTURA Y MÉTODOS DEL SOFTWARE

5.1 Estructura y funcionamiento general

El programa tiene cuatro etapas principales durante su ejecución. El siguiente esquema describe el funcionamiento general del programa:

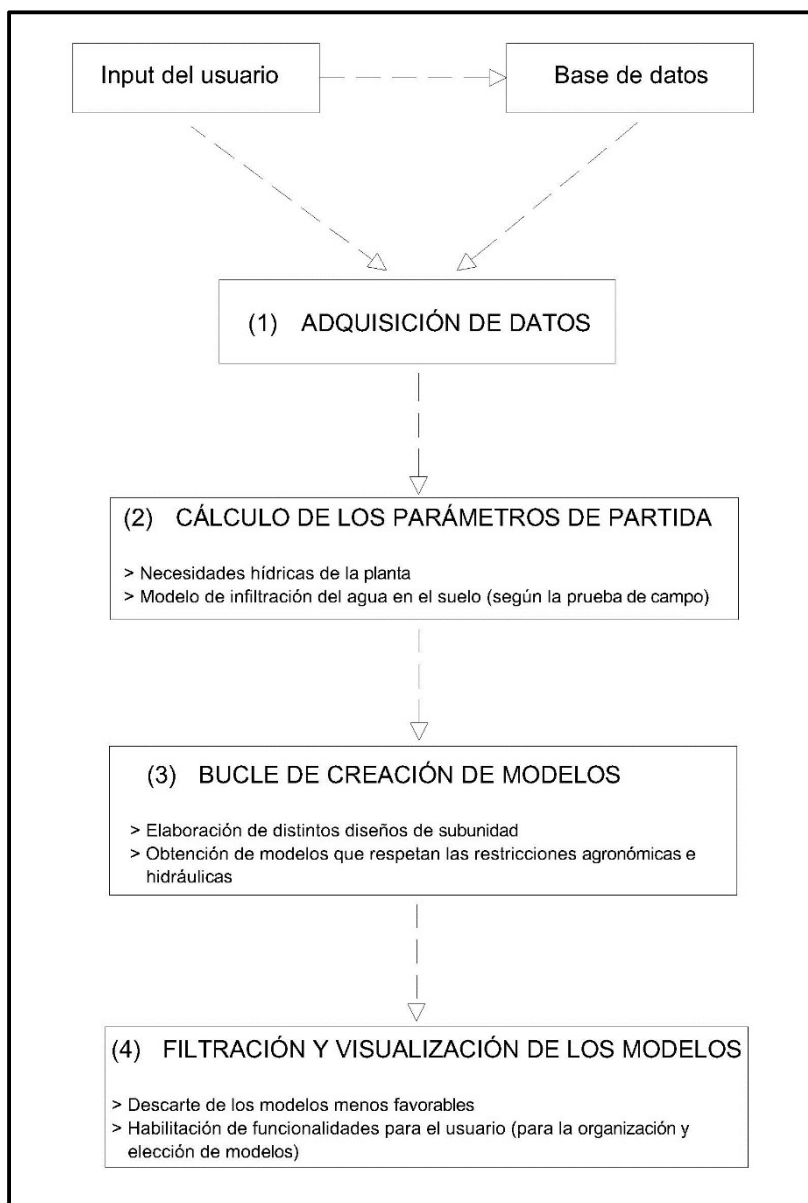


Figura 5. Esquema del funcionamiento general del programa

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

El punto (3) es la parte del programa que más tiempo consume, ya que repite muchas veces los mismos cálculos, algunos con operaciones de complejidad media-elevada (potencias, raíces, exponenciales...). A medida que se van creando modelos en el bucle, estos se almacenan aparte, en una estructura de datos denominada *vector* (proporcionada por la librería "std" de C++).

5.2 Input del software

La información necesaria para poder poner en marcha el programa debería estar a disposición de cualquier usuario, siempre que tenga acceso a Internet. El input que debe introducirse es el siguiente:

- Dimensiones de la parcela (longitud y anchura, en m).
- Pendiente de la parcela (en %).
- Cultivo a implantar y cultivo adyacente a la parcela.
- Marco de plantación (separación entre plantas y separación entre líneas, en m).
- Evapotranspiración de referencia (ET_0) de la estación agroclimática más cercana (en mm.día^{-1}). Ésta debe ser el valor medio de las ET_0 en los últimos diez años, en el mes más caluroso del año.
- Jornada de riego disponible (en h.día^{-1}).
- Conductividad eléctrica del agua de riego (en mmhos.cm^{-1} o dS.m^{-1}).
- **Prueba de Campo:** Es el input más importante ya que tiene un fuerte impacto en los resultados del diseño agronómico y por tanto en el diseño de los modelos (subunidades de riego). Es por ello que el programa debe recibir suficiente información para obtener una regresión más o menos fiel a la realidad.
- (Opcional) Profundidad radicular del cultivo (en m).
- (Opcional) Diámetro aéreo del cultivo (en m).
- (Opcional) Intervalo máximo entre riegos (en días).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Nota: A partir del cultivo a implantar, el programa accederá a la base de datos y extraerá los valores de los parámetros característicos del cultivo. Si el usuario introdujese la profundidad radicular de su cultivo y/o el diámetro aéreo del mismo, el programa utilizaría los valores proporcionados por el usuario en vez de los establecidos en la base de datos.

5.3 Metodología recomendada para la Prueba de Campo

Se recomienda probar, al menos, 2 tipos de emisores (con diferente caudal) y tomar unas 10 medidas para cada uno (en intervalos de 15 minutos) del diámetro y la profundidad del bulbo húmedo (de forma más o menos simultánea). Para ello, una forma práctica de hacerlo es utilizando llaves de paso interlínea para tuberías de riego por goteo. Así, se debería montar una tubería por cada tipo de emisor a probar, con una separación entre goteros de 1m o más y con una llave de paso entre cada uno de ellos.

Para llevar a cabo las mediciones es necesario abrir una franja de al menos medio metro de profundidad y lo suficientemente ancho para poder medir el bulbo húmedo. La idea es hacer circular el agua por la tubería y cada 15 minutos cerrar una llave de paso (empezando por el final). De esta manera, con 10 emisores obtendríamos 10 datos a lo largo de 150 minutos. Cuanto mayor sea el número de datos (y por tanto el número de emisores y el tiempo de la prueba), más fiable será el resultado.

5.4 Establecimiento del modelo de infiltración del agua en el suelo

El objetivo de la prueba de campo es extraer un modelo para la evolución del diámetro mojado y otro modelo para la profundidad radicular del bulbo húmedo, en función del tiempo, para cada tipo de emisor (para cada caudal distinto). Así, se obtendrán dos modelos para cada caudal de prueba, que representan, de forma conjunta, el modelo de infiltración del agua en el suelo.

El programa realizará entonces las siguientes regresiones:

- Regresión Linear
- Regresión Polinómica

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

· Regresión Logarítmica

Se calculará el valor de R^2 de cada una de las regresiones y, para cada caudal, se escogerá el modelo del diámetro mojado y el de la profundidad radicular con el mayor R^2 de las tres regresiones correspondientes.

5.5 Cálculo de las necesidades hídricas netas diarias de la planta (NT_n)

Las necesidades hídricas de la planta, junto al modelo de infiltración del agua en el suelo, es un parámetro básico que se determina antes de entrar en el bucle de creación de modelos. El cálculo de las necesidades hídricas de la planta exige determinar primero los siguientes coeficientes:

a) Coeficiente de cultivo (k_c)

El coeficiente de cultivo es propio de cada especie y permite determinar la Evapotranspiración de la planta a partir de la ET_0 , que es la evapotranspiración de un cultivo de referencia. Su valor se extrae de la base de datos del programa (tabla 4), según el cultivo elegido por el usuario. Como explica la FAO, el coeficiente k_c tiene en cuenta diversos aspectos del cultivo, bajo condiciones estándar (clima subhúmedo, humedad relativa media del 45% y vientos $< 2m.s^{-1}$). Uno de los factores que se tienen en cuenta es el marco de plantación típico de cada cultivo, así como su altura. En cultivos anuales, el valor de k_c puede llegar a valer 1.15-1.2 mientras que en cultivos permanentes (frutales mayormente) puede llegar a valer 0.5-0.6, ya que los marcos de plantación son muchos más amplios (FAO, 1998).

b) Coeficiente por localización (k_1)

En riego localizado, solo se moja una pequeña porción del terreno (excepto cuando nos encontramos con marcos de plantación muy estrechos). Esto da pie a una menor evaporación de agua, pero simultáneamente se incrementa la transpiración del cultivo, ya que al estar más seco el suelo (más caliente) la irradiación es mayor y por tanto la planta transpira más. El coeficiente k_1 representa el balance Evaporación – Transpiración, teniendo en cuenta el marco de plantación y la fracción del área sombreada por la planta (A_s).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Hay cuatro autores que han propuesto una ecuación, cada uno, para determinar el valor de k_1 en función de A_s (que a su vez depende del diámetro aéreo, D_a , y del marco de plantación). Según la situación, las cuatro ecuaciones dan resultados alejados. Por eso se adopta el siguiente método (el más utilizado): se descartan los valores extremos y se coge la media entre los dos valores restantes.

$$(2) \left\{ \begin{array}{l} k_1 = 1,34 \cdot A_s \text{ (Aljibure)} \\ k_1 = 0,1 + A_s \text{ (Decroix)} \\ k_1 = A_s + 0,5(1 - A_s) \text{ (Hoare)} \\ k_1 = A_s + 0,15(1 - A_s) \text{ (Keller)} \end{array} \right. \quad A_s = \frac{D_a^2 \cdot \pi}{4ab} \quad (3)$$

c) Coeficiente por variación climática (k_2)

A diferencia del riego por gravedad, el riego de precisión (aspersión y riego por goteo, principalmente) se diseña para que pueda aportar una determinada cantidad de agua por unidad de tiempo, de forma óptima, segura y durable. Así, se aplica un coeficiente mayorante con el objetivo de reflejar la previsión del aumento de las temperaturas en las próximas décadas. No hay un método exacto para calcular este coeficiente, pero generalmente se adoptan valores entre 1,1 y 1,2 (Arviza, 1996). En este programa se adopta el valor de 1,2 (un 20% adicional) ya que, en España, el cambio climático causará veranos más calurosos en comparación a muchas regiones de Europa o del mundo.

d) Coeficiente por advección (k_3)

El fenómeno de advección, en términos de contenido de agua en el suelo, se define como el movimiento de agua debido a una variación en el potencial (gradiente) hídrico y osmótico. Cuando regamos una parcela, en función del tamaño de ésta y en función de lo que la rodea (parcelas sin cultivar, cultivos arbóreos, cultivos herbáceos...), la diferencia de potencial provocará una variación (a veces positiva) de agua en nuestra parcela. Por tanto, para corregir esta variación, utilizamos el coeficiente k_3 que se extrae del siguiente gráfico:

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

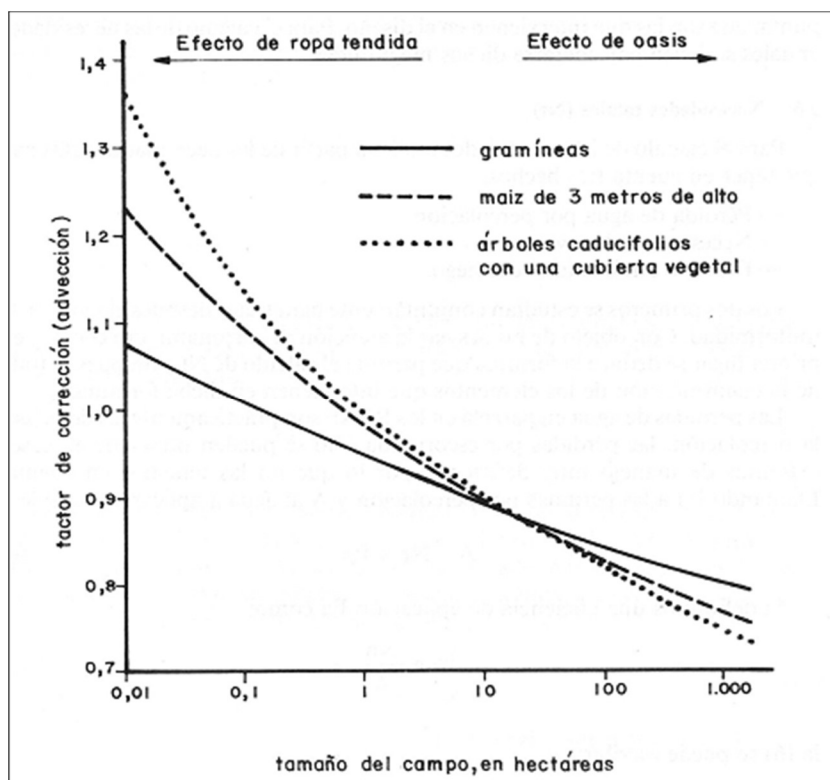


Figura 6. Curvas de K_3 según el tipo de cultivo adyacente a la parcela (FAO, 1977)

Tal como explican Doorenbos y Pruitt en (FAO, 1977), este coeficiente solo debe usarse en parcelas con una superficie mayor o igual a 0,05ha, ya que si no se obtendrían valores muy altos de k_3 y eso llevaría a regar en cantidades mucho mayores, lo que puede ralentizar el crecimiento del cultivo.

Para el programa, se extrajeron las ecuaciones generales a partir del gráfico, para poder calcular el valor de k_3 directamente. Estos son los puntos extraídos del gráfico:

Tabla 10. Datos extraídos de las curvas de k_3

Superficie	k_3 - gramíneas	k_3 - árboles	k_3 - maíz
0,01	1.07319	1.36203	1.22876
0,1	1.00759	1.13542	1.09126
1	0.94744	0.99574	0.98136
10	0.89068	0.90126	0.89487
100	0.84195	0.81956	0.82642
1000	0.80364	0.74989	0.76852

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Los datos se extrajeron mediante AutoCAD, midiendo distancias y escalando:

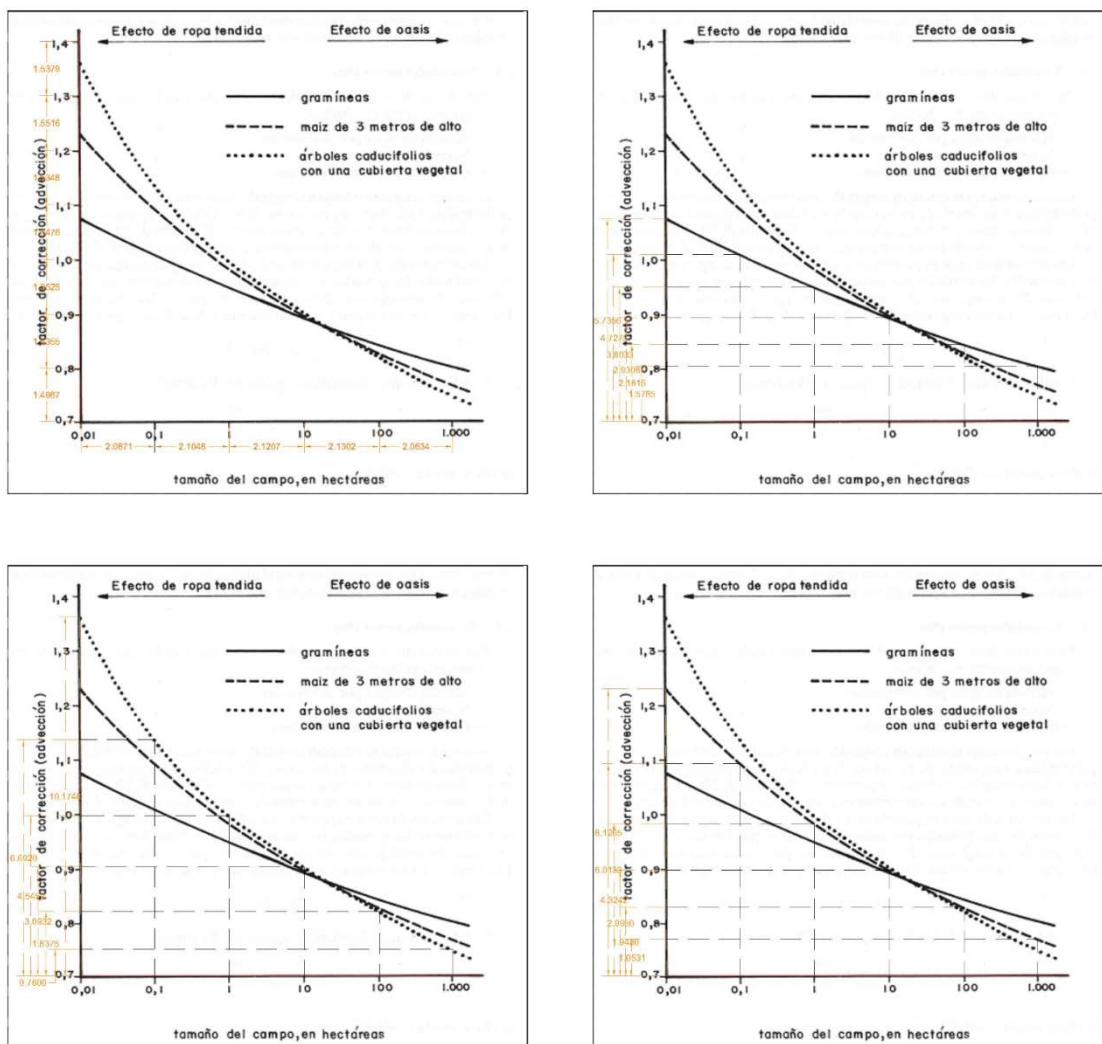


Figura 7. Proceso de extracción de datos mediante AutoCAD

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Las ecuaciones resultantes de las regresiones realizadas con Excel son las siguientes:

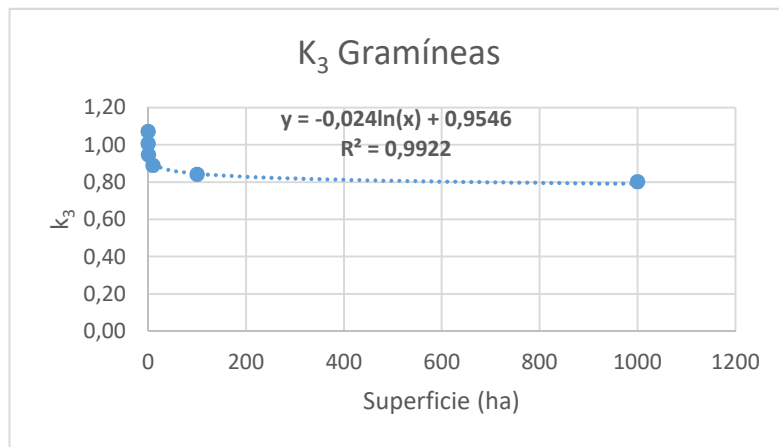


Figura 8. Regresión logarítmica de los datos de k_3 - gramíneas

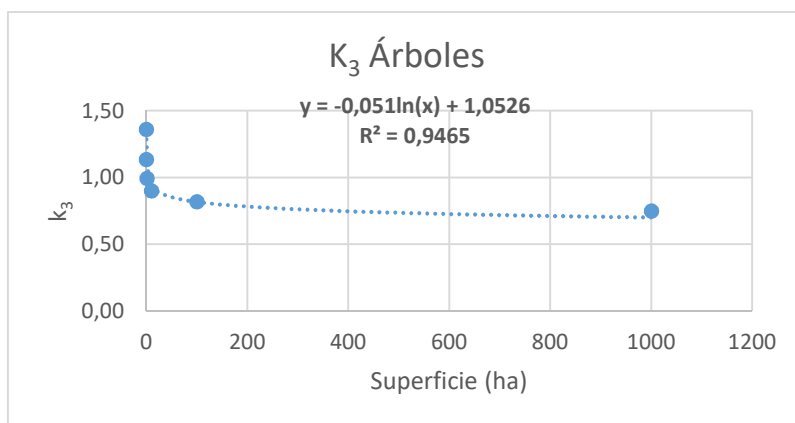


Figura 9. Regresión logarítmica de los datos de k_3 - árboles

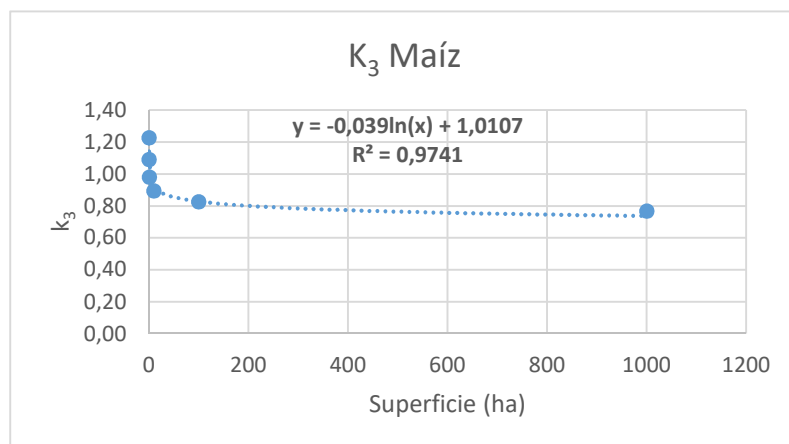


Figura 10. Regresión logarítmica de los datos de k_3 - maíz

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Una vez determinados estos cuatro coeficientes, se procede al cálculo de las necesidades hídricas netas de la planta (en mm. día⁻¹):

$$NT_n = ET_0 \cdot k_c \cdot k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \quad (4)$$

NT_n representa las necesidades netas de la planta. Debido a la heterogeneidad del suelo y de la temperatura en la parcela, así como a los defectos de fábrica de los emisores de riego, existen desviaciones en el agua que recibirán las plantas respecto al óptimo. Por esa razón es necesario aplicar tres coeficientes (correcciones) que miden esas desviaciones: el Coeficiente de Uniformidad teórico (CU_t), la Eficiencia de Aplicación teórica y la Fracción de Lavado.

5.6 Cálculo de las necesidades hídricas reales diarias de la planta (NT_r)

Como se ha mencionado en el punto anterior, para calcular el valor de NT_r es necesario determinar los siguientes coeficientes:

a) Coeficiente de Uniformidad (CU)

En el capítulo 6 (Base de datos) se establece que $CU_t = 1$, ya que trabajamos con goteros autocompensantes y la uniformidad de riego es casi del 100%.

b) Eficiencia de Aplicación (E_a)

El valor de la Eficiencia de Aplicación se extrae de las tablas presentadas en las tablas 8 y 9, que aparecen en el capítulo 6.

c) Fracción de Lavado (LR)

La salinidad de los suelos y del agua de riego son dos factores a tener en cuenta para el diseño del riego y la toma de decisiones (lavado de sales del suelo, desobturización de las tuberías y/o emisores de riego...). Cada tipo de cultivo tiene un umbral de salinidad a partir del cual empieza a reducir su rendimiento. Cuando regamos, el agua arrastra las sales del suelo (y las que ya contenía en un inicio), depositándose, mayormente, en la periferia del bulbo húmedo (incluyendo la zona superficial, alrededor del emisor de riego). Esa zona con acumulación de sales representa un peligro ya que, además de suponer un desequilibrio químico para la planta,

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

hace de barrera física para las raíces. Así, en riego localizado, se recurre a aumentar la dosis de riego para distanciar esa "costra" salina de las raíces de la planta, mientras que con otros sistemas de riego se recurre a lavar el suelo (aplicando una gran cantidad de agua de golpe).

$$LR = \frac{CE_w}{2CE_{es}} \quad (5)$$

Dónde:

- CE_w es la conductividad eléctrica del agua de riego (en mmhos.cm⁻¹ o dS.m⁻¹)
- CE_{es} es la conductividad eléctrica máxima del extracto saturado del suelo (en mmhos.cm⁻¹ o en dS.m⁻¹)

Una vez conocidos los valores de CU, E_a y LR, se procede al cálculo de NT_r , siguiendo el método expuesto por Arviza (1996):

$$NT_r = MAX (V_1; V_2) \quad (6)$$

$$- V_1 = \frac{NT_n}{E_a \cdot CU}$$

$$- V_2 = \frac{NT_n}{E_a \cdot (1 - LR)}$$

Si $V_2 > V_1$,

$$V_2 = \frac{NT_n}{E_a \cdot CU \cdot (1 - LR)} = NT_r \quad (7)$$

Dónde:

- E_a es la Eficiencia de Aplicación teórica (adimensional)
- CU es el Coeficiente de Uniformidad teórico (adimensional)
- LR es la Fracción de Lavado (adimensional)

5.7 Casuística general en la distribución de las plantas respecto a su morfología.

En cultivos hortícolas, los marcos de plantación suelen ser estrechos, pero puede haber casos en los que no. Cuando el marco de plantación es muy amplio (plantas muy separadas), no interesa mojar la totalidad del terreno de cultivo ya que habrá zonas en las que la planta no llegará (sus raíces). Es por ello que se ha realizado un pequeño estudio a partir de AutoCAD, para poder evaluar esta situación de forma sistemática.

Se trata de relacionar la separación entre plantas (a) y entre líneas (b) con su diámetro aéreo (D_a), que a su vez está relacionado con la extensión de las raíces. Así, se consideran 3 casos generales, que dan lugar a distintos métodos para el cálculo del área que se pretende mojar (A_m):

a) **Caso genérico 1:** $D_a > 0.5b$ y $D_a > 0.5a$

$$A_m = L_m \cdot l_m \quad (L_m = b, \quad l_m = a) \quad (8)$$

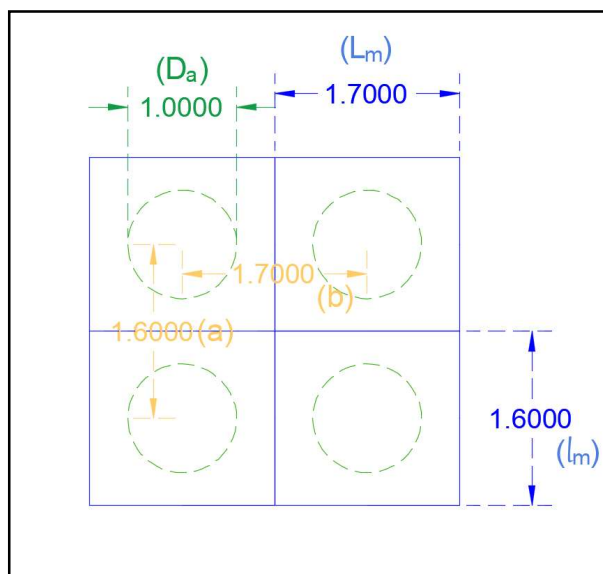


Figura 11. Esquema del caso genérico 1

Nota: El área que se pretende mojar (A_m) es la superficie a mojar para cada planta. Por tanto la superficie total a mojar (A_{tot}) quedaría así: $A_{tot} = A_m \cdot n_{plantas}^o$

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

b) **Caso genérico 2:** $D_a \leq 0.5b$ y $D_a > 0.5a$

$$A_m = L_m \cdot a \quad (L_m = 1,4D_a) \quad (9)$$

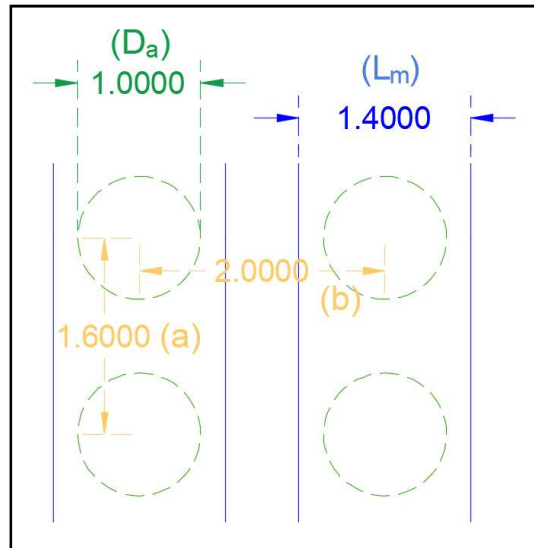


Figura 12. Esquema del caso genérico 2

c) **Caso genérico 3:** $D_a \leq 0.5b$ y $D_a \leq 0.5a$

$$A_m = \frac{L_m^2 \cdot \pi}{4} \quad (L_m = 1,4D_a) \quad (10)$$

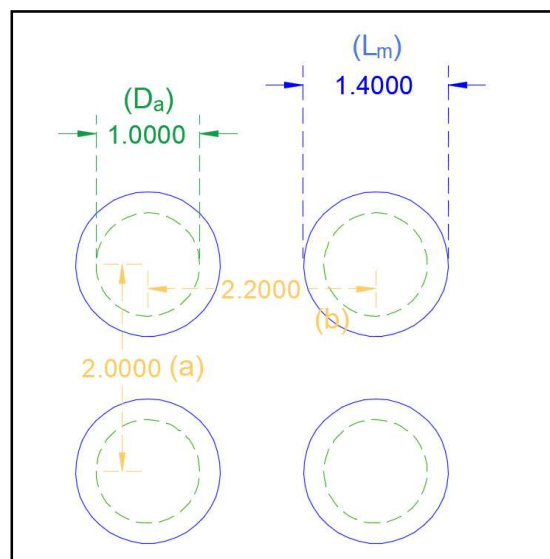


Figura 13. Esquema del caso genérico 3

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Cuando $D_a \leq 0.5b$, significa que entre líneas de plantas cabría al menos otra línea de plantas. Lo mismo ocurre cuando $D_a \leq 0.5a$. Es por ello que, cuando se cumple una de estas dos condiciones, el área que se pretende mojar (A_m) varía y por tanto el método de cálculo también.

Nótese que no se considera la situación " $D_a > 0.5b$ y $D_a \leq 0.5a$ " ya que, en caso de que la separación entre líneas de plantas (b) fuese inferior a la separación entre plantas (a), el programa invertiría automáticamente los valores. Esto se debe a que los laterales de riego se disponen en las líneas de plantas, por lo que, a menor separación entre plantas (a) de la misma línea, menos tubería se necesitará por unidad de planta. Simultáneamente, a mayor separación entre líneas de plantas (b), menor número de tuberías habrá que poner.

Dado que, a priori, las tuberías proporcionadas por las distintas casas comerciales son modelos estándar (no modificables), el caso **c**) es muy poco recomendable ya que implicaría que la separación entre emisores coincidiese con la separación entre plantas y, además, sería necesario aportar todo el volumen de agua con un emisor por planta. Es por ello que se recomienda escoger marcos de plantación en los que no se dé esta situación. De hecho, el programa **no** funciona cuando se encuentra con esta situación y por tanto habría que modificar el marco de plantación. Puesto que el caso **c**) es el único en el que se contempla $D_a \leq 0.5a$, la casuística general queda reducida a dos casos simples: $D_a \leq 0.5b$ y $D_a > 0.5b$.

5.8 Creación de modelos (bucle principal del programa)

Una vez se ha determinado el valor de NT_r , el modelo de infiltración del agua según cada caudal y con la casuística general definida, se procede a realizar todos los diseños posibles.

A esta etapa del programa se le denomina "bucle principal" ya que es un proceso (cálculos e iteraciones) que se repite gran cantidad de veces. La estructura de este bucle es de tipo recursiva, es decir que empieza por ejecutar una función, que a su vez ejecutará otra función...

Si se consiguen llamar todas las funciones del bucle recursivo, significa que los parámetros que caracterizan el modelo han pasado las restricciones (estas se definen más adelante, en cada función). De esta manera, solo se construye un modelo al final de la última función recursiva (*SetFinalModels*). En ese momento, la información del modelo se almacenará aparte, en un

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

vector de modelos (el cual irá almacenando todos los que se construyan). Una vez se crea un modelo, el programa se remonta en la *pila recursiva*, es decir, a la función anterior, para construir un nuevo modelo (modificando solo el último parámetro calculado respecto al modelo anterior). De alguna manera se puede decir que se está creando un árbol de modelos, donde cada camino representa un modelo y cada nudo representa uno o más parámetros del mismo.

Se ha elaborado el siguiente esquema para facilitar la comprensión de lo explicado en el párrafo anterior:

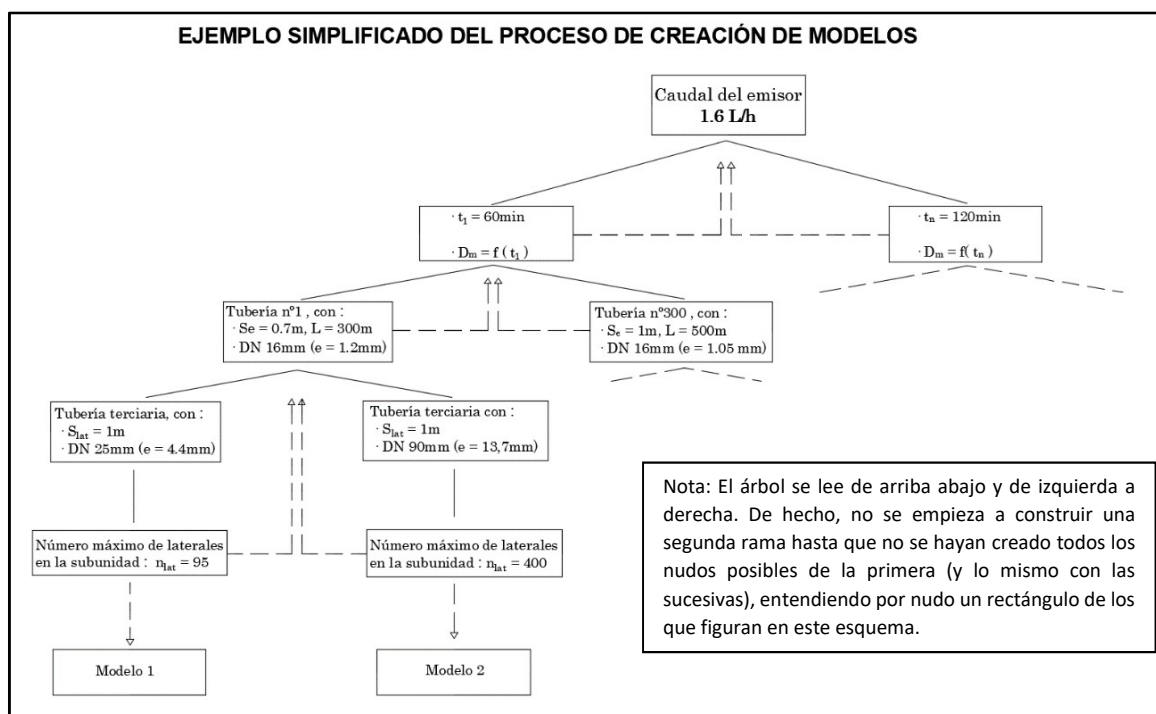


Figura 14. Esquema del proceso de creación de modelos

En este ejemplo se consideran pocas posibilidades (un solo caudal, 2 tiempos de riego, 2 tuberías laterales, 2 tuberías terciarias...) por cuestión de espacio en la representación de estas.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

En el esquema tampoco se muestran todos los parámetros calculados y que conforman un modelo. Se han incluido los parámetros más representativos con tal de dar una idea general. Las características principales y secundarias de los modelos se definen en las siguientes tablas:

Tabla 11. Parámetros principales de un modelo

Parámetro	Unidad
Longitud de los laterales	<i>m</i>
Separación entre emisores	<i>m</i>
Diámetro de los laterales	<i>mm</i>
Longitud de la terciaria	<i>m</i>
Separación entre laterales	<i>m</i>
Diámetro de la terciaria	<i>mm</i>
Caudal medio de los emisores	<i>L.h⁻¹</i>
Área total de la subunidad	<i>m²</i>
Presión de trabajo	<i>mca</i>
Porcentaje de suelo mojado	%
Tiempo de riego	<i>min</i>
Intervalo entre riegos	<i>días</i>

Tabla 12. Parámetros secundarios de un modelo

Parámetro	Unidad
Velocidad del agua al inicio del lateral	<i>m.s⁻¹</i>
Velocidad del agua al inicio de la terciaria	<i>m.s⁻¹</i>
Presión al inicio del lateral medio.	<i>mca</i>
Diámetro mojado	<i>m</i>
Profundidad del bulbo húmedo	<i>m</i>
Solapamiento entre emisores del mismo lateral	%
Separación entre emisores de laterales contiguos.	%
Desnivel de la tubería terciaria	<i>m</i>
Desnivel de los laterales	<i>m</i>

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Los métodos (funciones) empleados son los siguientes (los nombres de las funciones se presentan tal y como se definieron en el código):

a) *FindValidFlows*

A partir de la base de datos de las tuberías comerciales, se recogen todas aquellas que tengan un caudal medio de los emisores que coincida con alguno de los que se han estudiado en la prueba de campo. Éstas se organizarán por grupos, según el caudal medio de los emisores. Una vez completado este proceso, se llamará a la función *SetFlowAndWetDiameters*, una sola vez.

b) *SetFlowAndWetDiameters*

En base al modelo de infiltración del agua, se determinará el tiempo de riego mínimo y el tiempo máximo (para el caudal en cuestión), mediante la siguiente restricción:

$$D_z \in [0.9D_r ; 1.2D_r]$$

Dónde: D_z es la profundidad del bulbo húmedo (en m) y D_r es la profundidad radicular del cultivo (en m).

Así se obtendrá:

$$t_{min} \text{ tal que } f_{q=x}(t_{min}) = 0.9D_r \quad (11)$$

$$t_{max} \text{ tal que } f_{q=x}(t_{max}) = 1.2D_r \quad (12)$$

Esto se debe a que, si regáramos demasiado tiempo (tal que $D_z > 1.2D_r$), parte del bulbo húmedo (en definitiva, el agua) quedaría fuera del alcance de las raíces de la planta y se perdería por percolación (filtración). Si, por el contrario, regáramos muy poco tiempo (tal que $D_z < 0.9D_r$), la periferia del bulbo húmedo podría encontrarse en la zona más activa a nivel radicular. Como se ha comentado antes, en la periferia del bulbo húmedo se forma una costra debido a la acumulación de sales. Es por eso que queremos alejarla lo suficiente de la zona más activa de la planta.

El cálculo del intervalo $[t_{min} ; t_{max}]$ se realizará tantas veces como caudales de prueba se hayan aportado. Se cogerán entonces, a intervalos de 5 minutos, todos los tiempos que estén entre

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

$[t_{min} ; t_{max}]$. Para cada tiempo de riego (t_{riego}) obtenido, se llamará a la función *SetLateralSeparations*, tantas veces como tuberías con el caudal en cuestión haya, asignando, al modelo que se esté construyendo, el valor del caudal de los emisores (q_e) junto al t_{riego} dado y al diámetro mojado correspondiente (obtenido a partir del modelo de infiltración del agua y a partir de t_{riego}).

c) *SetLateralSeparations*

La separación entre laterales (S_{lat}) no puede ser un valor estándar de los fabricantes, ya que viene impuesto por la separación entre líneas de plantas (b):

$S_{lat} = k \cdot b$, donde k es un número natural

Desde esta función en adelante interviene la casuística general definida anteriormente. Para definir la separación entre laterales se tienen en cuenta los dos siguientes casos:

Tabla 13. Restricciones agronómicas en la función *SetLateralSeparations*

Caso genérico	Restricción de solapamientos	Intervalo de restricción por solapamientos	Separación entre laterales válida
$D_a \leq 0.5b$	No	-	$S_{lat} = b$
$D_a > 0.5b$	10 - 40%	$0.6D_m < S_{lat} < 0.9D_m$	La que cumpla la restricción

Cada vez que se establece un valor válido de S_{lat} , se llamará a la función *SetDripSeparations*, asignando así un valor de S_{lat} al modelo que se esté construyendo.

d) *SetDripSeparations*

Dado que la tubería lateral del modelo ya ha sido establecida en la función *SetFlowAndWetDiameters*, se procede a extraer el valor de la separación entre emisores (S_e), característico de la tubería.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Para determinar si el valor de S_e es válido también hay que tener en cuenta la casuística de la distribución de las plantas. Entonces, se consideran también dos casos:

Tabla 14. Restricciones agronómicas en la función *SetDripSeparations*

Caso genérico	Intervalo de restricción por solapamientos	Restricción por el aporte de agua	Cálculo de n_e debido al caso genérico	Restricción por doble solapamiento	Área mínima a mojar ($P_m = 90\%$)
$D_a \leq 0.5b$	$0,6D_m < S_e < 0,9D_m$	$1,2NT_r \geq \frac{n_e \cdot q_e \cdot t_{riego}}{I} > 0,9NT_r$	$n_e = \frac{a}{S_e}$	-	$0,9 \cdot A_m$
$D_a > 0.5b$	$0,6D_m < S_e < 0,9D_m$	$1,2NT_r \geq \frac{n_e \cdot q_e \cdot t_{riego}}{I} > 0,9NT_r$	$n_e = \frac{a \cdot b}{S_e \cdot S_{lat}}$	$D_m \geq \sqrt{S_e^2 + S_{lat}^2}$	$0,9 \cdot A_m$

Dónde:

- D_m es el diámetro mojado
- S_e es la separación entre emisores (fijada por la tubería que se esté probando)
- NT_r son las necesidades hídricas reales diarias del cultivo (en L · día⁻¹ · planta⁻¹)
- n_e es el nº de emisores por planta (emisores.planta⁻¹)
- I es el intervalo entre riegos (en días)
- q_e es el caudal medio de los emisores (en L.h⁻¹)
- A_m es el área que se pretende mojar (en m²)

Respecto a las necesidades hídricas de la planta (NT_r), se empieza fijando un intervalo entre riegos de 0'5días, y se irá incrementando su valor (de 0'5 en 0'5) hasta que se cumpla la restricción de la figura 14, con un intervalo máximo entre riegos de 2'5días (o en su caso, el que haya introducido el usuario). Si no se cumpliera la restricción con alguno de los intervalos de riego (dentro del rango establecido), significaría que el marco de riego (distribución de laterales y emisores) no es válido, dado que estaríamos aplicando agua de más (o de menos).

Como a esta función se le impone el valor de S_{lat} (fijado por la función anterior), si nos encontráramos en el segundo caso de la figura 13 (y por tanto hubiese solapamiento entre laterales), aparecería una restricción particular (adicional), definida en la figura 14 como

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

“restricción por doble solapamiento”. Esto tiene una explicación, que se verá ilustrada en la siguiente figura:

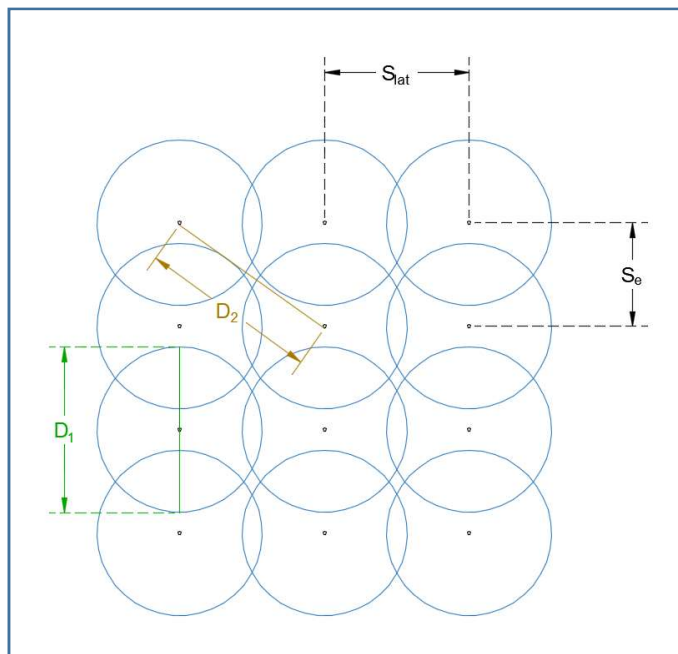


Figura 15. Influencia del marco de riego en los solapamientos según el diámetro mojado por los emisores.

Como se puede observar en la figura 15, el doble solapamiento ocurre cuando $D_2 \leq D_1$

Dónde:

· D_1 corresponde al diámetro mojado (D_m)

$$\cdot D_2 = \sqrt{S_e^2 + S_{lat}^2}$$

Respecto a la superficie mojada por los emisores (S_m), ésta se calcula en función del caso genérico en el que nos encontremos (al igual que el cálculo del área que se pretende mojar, A_m , definido en el capítulo 7.7):

Tabla 15. Método de cálculo de la superficie mojada (S_m) según la situación

Caso genérico	S_m	A_m
$D_a \leq 0.5b$	$\frac{n_e \cdot D_m^2}{4} \cdot \pi - A_{Se}$	$1,4 \cdot D_a \cdot a$
$D_a > 0.5b$	$\frac{n_e \cdot D_m^2}{4} \cdot \pi - A_{Se} - A_{Le}$	$a \cdot b$

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

El cálculo de A_{Se} y A_{Le} se basa en el cálculo del área formada por un segmento circular. En la siguiente figura se muestra la caracterización de los solapamientos:

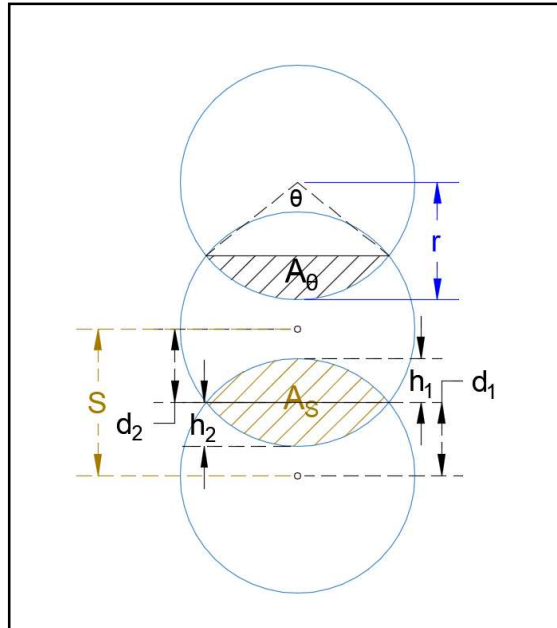


Figura 16. Solapamiento entre emisores de riego

Dónde:

- S es la separación entre emisores (sea entre los del mismo lateral o entre laterales contiguos)
- A_θ es el área formada por el segmento circular de ángulo θ .
- A_s es el área solapada entre cada emisor ($A_s = 2 \cdot A_\theta$)
- r es el radio mojado (es decir $\frac{D_m}{2}$)

El cálculo de A_θ viene dado por la siguiente expresión:

$$A_\theta = \frac{r^2}{2} \cdot (\theta - \sin(\theta)) \quad (13)$$

y $\theta = 2 \arccos\left(\frac{d}{r}\right)$, por lo que nos quedaría:

$$A_\theta = \arccos\left(\frac{d}{r}\right) \cdot r^2 - \frac{r^2 \cdot \sin(2 \arccos(\frac{d}{r}))}{2} \quad (14)$$

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Dónde:

· d correspondería a d_1 o d_2 de la figura 31.

· r es el radio mojado es decir $\frac{D_m}{2}$

Se relacionó el valor de d con la separación entre emisores (S):

$$d_1 = d_2 \text{ y } S = d_1 + d_2$$

Por lo que $d_1 = \frac{S}{2} = d_2$ **(15)**

Así, quedaría:

$$A_\theta = 2\arccos\left(\frac{S}{2r}\right) \cdot r^2 - \frac{r^2 \cdot \sin(2\arccos(\frac{S}{2r}))}{2} \quad (16)$$

Para el solapamiento entre emisores del mismo lateral, $S = S_e$.

Para el solapamiento entre emisores de laterales contiguos, $S = S_{lat}$.

En cuanto un valor de S_e permita que se cumplan todas las restricciones descritas en la tabla 15, se llamará a la función *SetTertiaryDiameters*.

e) SetTertiaryDiameters

En esta función lo único que hace el programa es iterar sobre todos los diámetros estándar de tuberías terciarias que contiene la base de datos. Cada tubería terciaria lleva asociada una presión nominal (PN) y un diámetro nominal (DN) así como un espesor (e), como se verá más adelante (figura 33). Así, se llamará a la siguiente función (*SetFinalModels*) tantas veces como diámetros disponibles haya.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

f) *SetFinalModels*

Al llegar a este punto, casi todos los parámetros principales han sido determinados, exceptuando la longitud de las tuberías. Respecto a las tuberías laterales, como se ha comentado al principio, las casas comerciales tienen longitudes estándar, por lo que se obtendrán longitudes que cuadren con ellas.

El cálculo de la longitud máxima de las tuberías está condicionado por los siguientes parámetros:

- Separación entre emisores y separación entre laterales
- Tipo de goteros (para este software, goteros autocompensantes)
- Diámetro de la tubería terciaria y de los laterales
- Caudal medio de los emisores
- Material del que está compuesto la tubería (aquí, polietileno)
- Pendiente a lo largo de la tubería

Lo primero es verificar que la longitud estándar de los laterales proporcionada por el fabricante permite obtener un diseño hidráulico válido, en cuanto a presión y velocidad máximas de la tubería. Según la norma UNE, las presiones máximas para tuberías laterales de PE en instalaciones de micro-riego se especifican en la siguiente tabla:

Tabla 16. Espesor de las tuberías de PE de micro riego según DN y PN (Fuente: UNE, 2017)

Diámetro Exterior	Diámetro interior medio	Espesor	
DN	d_{im} mm	S10 PN2.5 e	S6,3 PN4 e
12	10,0 + 0,3	1,00 + 0,3	1,10 + 0,3
16	13,6 + 0,3	1,20 + 0,4	1,40 + 0,4
20	17,4 + 0,3	1,30 + 0,4	1,50 + 0,4
25	22,2 + 0,3	1,40 + 0,4	1,90 + 0,4

Todas las tuberías incluidas en la base de datos (excepto alguna de la marca Naandanjain) tienen espesores que coinciden con presiones nominales (PN) de 2.5bar.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Para comprobar que, con la longitud proporcionada por el fabricante no se sobrepasan los 2.5bar, se recurre a la fórmula de Blassius para las pérdidas de carga friccionales (h_f) en tuberías de polietileno, indicada especialmente para riego localizado (para tuberías lisas de polietileno):

$$h_f = C \cdot L \cdot \frac{Q^{1,75}}{D_i^{4,75}} \quad (17)$$

Dónde:

- C es el coeficiente de corrección debido a la temperatura del agua (calculado al principio del programa).
- L es la longitud de la tubería (en m)
- Q es el caudal de la tubería (en $L \cdot h^{-1}$)
- D_i es el diámetro interior de la tubería (en mm)
- h_f son las pérdidas de carga lineales/friccionales (en mca)

Además de estas pérdidas de carga (pérdidas de presión), existen pérdidas adicionales debidas al desnivel y también a los accesorios (pérdidas de carga singulares) que incluye la tubería (en los laterales, los únicos accesorios son los emisores de riego). Dado que nos encontramos con tuberías con emisores **integrados** autocompensantes, se asume que cada emisor conlleva una pérdida de carga equivalente a 0.23m de tubería (Arviza, 1996). Así, por cada tramo entre emisores, se deberá añadir esa longitud ficticia adicional.

El cálculo de h_f se realiza entonces tramo a tramo, por lo que las pérdidas de carga totales en la tubería, teniendo en cuenta la pendiente y las pérdidas singulares, quedarían así:

$$h_{tot} = \sum_{j=0}^n h_j = \sum_{j=0}^n \left[\left(C \cdot (L_j + 0,23) \cdot \frac{Q_j^{1,75}}{D^{4,75}} \right) + i \cdot L_j \right] \quad (18)$$

Dónde:

- h_{tot} son las pérdidas de carga totales en la tubería (en mca)

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

- h_j son las pérdidas del tramo j (en mca)
- C es el coeficiente de corrección
- L_j es la longitud del tramo j (en m).
- Q_j es el caudal del tramo j (en L/h)
- D es el diámetro de la tubería (en mm)
- i es la pendiente (en tanto por 1)
- j es el tramo de tubería en cuestión
- n es el número total de tramos (que corresponde al total de emisores)

Una vez se conocen las pérdidas de carga totales en la tubería, se determinará la presión al inicio de la tubería, comprobando que es inferior a los 2.5bar impuestos por la norma:

$$\cdot \boxed{P_0 = h_{tot} + P_{min}} \rightarrow P_0 \leq 25 \text{ mca} \quad (19)$$

Dónde:

- P_0 es la presión inicial de la tubería (en mca)
- h_{tot} son las pérdidas de carga totales (en mca)
- P_{min} es la presión mínima del gotero (establecida por el fabricante y extraída de la base de datos, en mca)

Se comprobará también que la velocidad al inicio del lateral no supera 1.5m/s:

$$\boxed{v = \frac{Q}{S}} \quad (20) \qquad \boxed{S = \frac{D_i^2 \cdot \pi}{4}} \quad (21)$$

Dónde:

- v es la velocidad del agua al inicio de la tubería (en m.s⁻¹)
- Q es el caudal al inicio de la tubería (en m³. s⁻¹)

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

· S es la área de la conducción (en m²)

· D_i es el diámetro interior de la tubería (en m)

Si se cumplen las restricciones definidas en esta función, solo falta determinar la longitud máxima de la terciaria para tener completo el diseño de un modelo de subunidad de riego.

Según la norma UNE, las presiones nominales (PN) de tuberías para la conducción de aguas (en nuestro caso, tuberías terciarias), se definen en la siguiente tabla, en función del diámetro nominal (DN) y el espesor de las paredes del tubo (e):

Tabla 17. Espesores de las tuberías de PE para la conducción de aguas, según DN y PN (Fuente: UNE, 2014)

Medidas en milímetros

	Series de tubos											
	SDR 6 S 2,5		SDR 7,4 S 3,2		SDR 9 S 4		SDR 11 S 5		SDR 13,6 S 6,3		SDR 17 S 8	
	Presión nominal, PN = en bar											
PE 40	-		PN 10		-		PN 6		-		PN 4	
PE 80	PN 25		PN 20		PN 16		PN 12,5		PN 10		PN 8	
PE 100	-		PN 25		PN 20		PN 16		PN 12,5		PN 10	
{A1▶}												
Dimensión nominal DN/OD	Espesor de pared ^b											
	e _{min.}	e _{máx.}	e _{min.}	e _{máx.}	e _{min.}	e _{máx.}	e _{min.}	e _{máx.}	e _{min.}	e _{máx.}	e _{min.}	e _{máx.}
16	3,0 ^c	3,4	2,3 ^c	2,7	2,0 ^c	2,3	-	-	-	-	-	-
20	3,4	3,9	3,0 ^c	3,4	2,3	2,7	2,0 ^c	2,3	-	-	-	-
25	4,2	4,8	3,5	4,0	3,0 ^c	3,4	2,3	2,7	2,0 ^c	2,3	-	-
32	5,4	6,1	4,4	5,0	3,6	4,1	3,0 ^c	3,4	2,4	2,8	2,0 ^c	2,3
40	6,7	7,5	5,5	6,2	4,5	5,1	3,7	4,2	3,0	3,5	2,4	2,8
50	8,3	9,3	6,9	7,7	5,6	6,3	4,6	5,2	3,7	4,2	3,0	3,4
63	10,5	11,7	8,6	9,6	7,1	8,0	5,8	6,5	4,7	5,3	3,8	4,3
75	12,5	13,9	10,3	11,5	8,4	9,4	6,8	7,6	5,6	6,3	4,5	5,1
90	15,0	16,7	12,3	13,7	10,1	11,3	8,2	9,2	6,7	7,5	5,4	6,1
110	18,3	20,3	15,1	16,8	12,3	13,7	10,0	11,1	8,1	9,1	6,6	7,4
125	20,8	23,0	17,1	19,0	14,0	15,6	11,4	12,7	9,2	10,3	7,4	8,3
140	23,3	25,8	19,2	21,3	15,7	17,4	12,7	14,1	10,3	11,5	8,3	9,3
160	26,6	29,4	21,9	24,2	17,9	19,8	14,6	16,2	11,8	13,1	9,5	10,6
180	29,9	33,0	24,6	27,2	20,1	22,3	16,4	18,2	13,3	14,8	10,7	11,9
200	33,2	36,7	27,4	30,3	22,4	24,8	18,2	20,2	14,7	16,3	11,9	13,2
225	37,4	41,3	30,8	34,0	25,2	27,9	20,5	22,7	16,6	18,4	13,4	14,9
250	41,5	45,8	34,2	37,8	27,9	30,8	22,7	25,1	18,4	20,4	14,8	16,4
280	46,5	51,3	38,3	42,3	31,3	34,6	25,4	28,1	20,6	22,8	16,6	18,4
315	52,3	57,7	43,1	47,6	35,2	38,9	28,6	31,6	23,2	25,7	18,7	20,7
355	59,0	65,0	48,5	53,5	39,7	43,8	32,2	35,6	26,1	28,9	21,1	23,4
400	-	-	54,7	60,3	44,7	49,3	36,3	40,1	29,4	32,5	23,7	26,2
450	-	-	61,5	67,8	50,3	55,5	40,9	45,1	33,1	36,6	26,7	29,5
500	-	-	-	-	55,8	61,5	45,4	50,1	36,8	40,6	29,7	32,8
560	-	-	-	-	62,5	68,9	50,8	56,0	41,2	45,5	33,2	36,7
630	-	-	-	-	70,3	77,5	57,2	63,1	46,3	51,1	37,4	41,3
710	-	-	-	-	79,3	87,4	64,5	71,1	52,2	57,6	42,1	46,5
800	-	-	-	-	89,3	98,4	72,6	80,0	58,8	64,8	47,4	52,3
900	-	-	-	-	-	-	81,7	90,0	66,1	72,9	53,3	58,8
1 000	-	-	-	-	-	-	90,8	100,0	73,5	80,9	59,3	65,4
1 200	-	-	-	-	-	-	-	-	88,2	97,2	71,1	78,4
1 400	-	-	-	-	-	-	-	-	102,8	113,3	83,0	91,5
1 600	-	-	-	-	-	-	-	-	117,5	129,4	94,8	104,4
1 800	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	106,6	117,4
2 000	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	118,5	130,4
{◀A1}												
a Los valores de PN están basados en C = 1,25.												
b Las tolerancias están en conformidad con el grado V de la Norma ISO 11922-1:1997 [7].												
c El valor calculado de e _{min.} (véase la Norma ISO 4065:1996 [5]) se redondea hasta el valor más próximos de los siguientes: 2,0, 2,3 o 3,0 para satisfacer ciertos requisitos nacionales.												

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

En el programa solo se usan tuberías de hasta 90mm, ya que finalmente la tubería terciaria deberá unirse a los laterales, que tienen un diámetro mucho menor.

Para calcular las pérdidas de carga en la tubería terciaria se usa también la ecuación de Blassius y, siguiendo el mismo razonamiento, quedaría definido por la siguiente expresión:

$$h_{tot} = \sum_{j=0}^n h_j = \sum_{j=0}^n \left[\left(C \cdot (L_j + 0,52) \cdot \frac{(Q_j)^{1,75}}{D^{4,75}} \right) + i \cdot L_j \right] \quad (22)$$

El programa realizará este cálculo hasta que, para un número dado de laterales, la presión o la velocidad del agua al inicio de la terciaria supere los límites establecidos (PN y v_{max}).

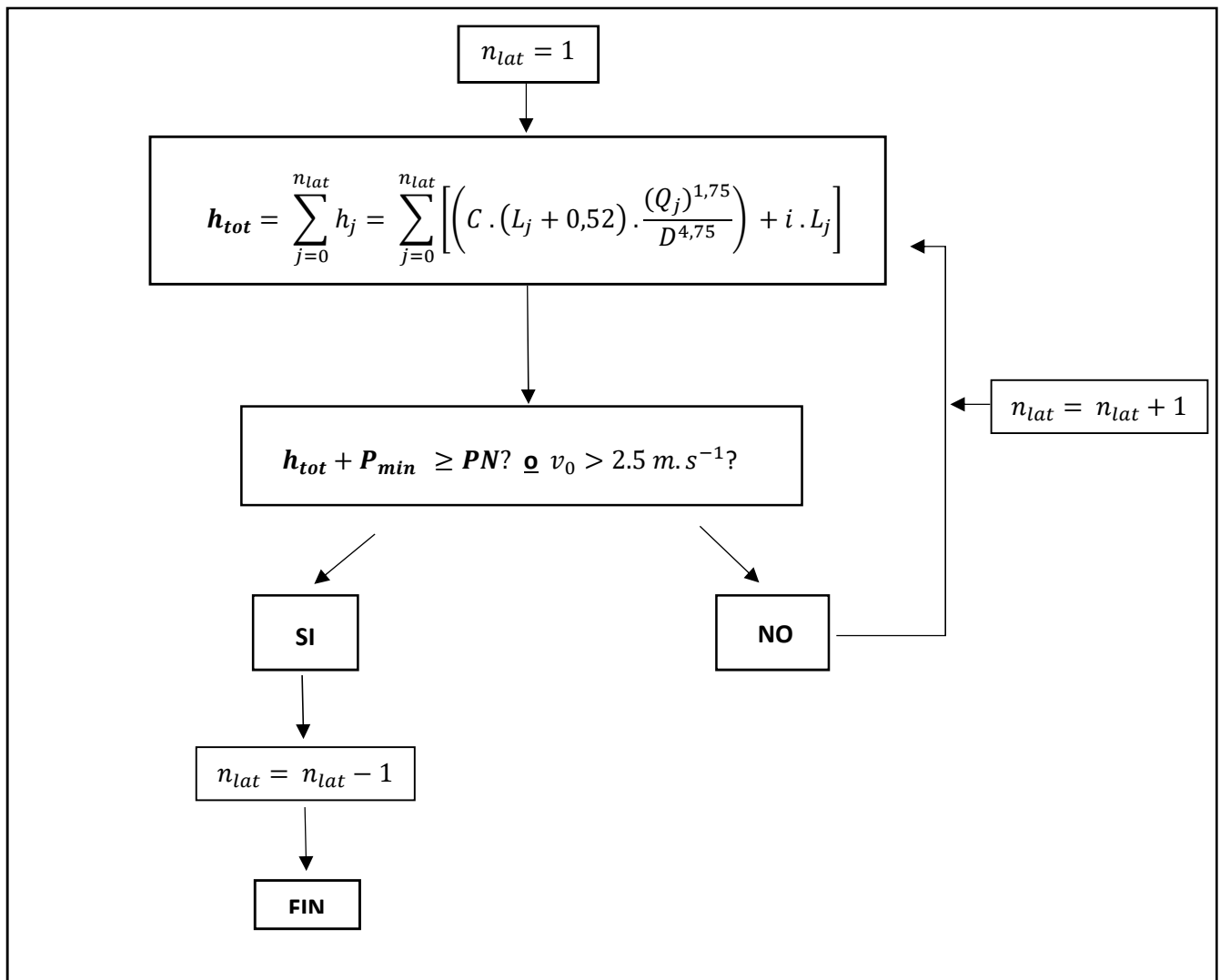


Figura 17. Esquema del bucle iterativo para el cálculo de la longitud máxima de la terciaria

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Con el número máximo de laterales establecido (n_{lat}), se procede a calcular la longitud máxima de la tubería terciaria:

$$L_{ter} = S_{lat} \cdot n_{lat} \quad (23)$$

Dónde:

- L_{ter} es la longitud de la terciaria
- S_{lat} es la separación entre laterales
- n_{lat} es el número de laterales

Una vez obtenido el valor de L_{ter} , ya se han calculado todos los parámetros necesarios para tener completado el diseño de la subunidad de riego. Por tanto, se terminará la función *SetFinalModels*, con lo que, siguiendo la pila de llamadas recursiva, se volverá a la función *SetTertiaryDiameters*, estableciendo un nuevo diámetro de terciaria y llamando otra vez a *SetFinalModels*, para crear un nuevo modelo (siempre que cumpla las restricciones).

Cuando la pila de llamadas quede vacía (cuando se hayan ejecutado todas las funciones por completo), se habrán creado todos los modelos posibles. De esta manera se obtienen muchos diseños distintos (entre 100 y 10.000, según la situación y siempre condicionado por la base de datos). Para facilitar la visualización y la posterior elección de un modelo (o varios), se realizará una organización y filtración de los diseños elaborados.

5.9 Organización y Filtración de modelos

Como se ha comentado en el capítulo 7.1, los modelos se almacenan en un *vector*. Así, cuando finaliza el bucle de creación de modelos todos ellos se encuentran almacenados en una misma estructura de datos. Para separarlos en grupos, se eligió la longitud de los laterales (L_{lat}) como el valor característico de cada grupo. Así, se obtendrán, como mucho, nueve grupos con $L_{lat} = \{25, 50, 75, 100, 200, 300, 350, 400, 500\}$, en m.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

A partir de aquí se filtrarán todos los grupos (uno a uno) de la siguiente manera y en el siguiente orden:

- 1) Se eliminarán del grupo el 25% de los modelos con el valor más bajo de longitud de la terciaria.
- 2) Con los modelos restantes, se eliminarán el 25% con el valor más bajo de porcentaje de suelo mojado (P_m)
- 3) De igual forma, se eliminarán el 25% con un valor en el aporte de agua más alejado de NT_r .
- 4) Otra vez, se eliminarán el 25% con el valor más alto del intervalo entre riegos.
- 5) Por último, se eliminarán el 25% de los modelos con un tiempo de riego más alto.

De esta manera se habrán reducido el número de modelos por grupo y se hará más ameno visualizarlos y elegir entre ellos.

5.10 Visualización de modelos

La visualización de modelos se estructuró de la siguiente manera: se muestran los grupos formados previamente y se permite acceder a ellos, uno por uno. Así, en cada grupo habrá distintos modelos que se podrán visualizar, también uno a uno. Para facilitar la elección de un modelo (o de varios), se habilitaron herramientas para ordenar los modelos de un mismo grupo. Los grupos pueden organizarse según los siguientes parámetros (en orden ascendente y descendente):

- Longitud de la terciaria
- Coste unitario (€/m²) *
- Intervalo entre riegos
- Tiempo de riego

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

En el ejemplo de aplicación que se describe en el siguiente capítulo se muestran la visualización de modelos y las herramientas de organización.

*El coste unitario es una estimación a partir de los datos proporcionados por CYPE Ingenieros (www.generadordeprecios.info).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

6. EJEMPLO DE APLICACIÓN: CULTIVO DE TOMATE EN UN PARCELA DE 5HA

6.1 Características del caso de ejemplo

Se considera una parcela con las siguientes características:

- Longitud: 500m
- Anchura: 100m
- Pendiente: 0.02 (2%), en el sentido de la anchura.
- Cultivo: Tomate
- Cultivo adyacente: Trigo (gramínea)
- Separación entre líneas de plantas (b): 0.85m
- Separación entre plantas (a): 0.60m
- Conductividad eléctrica del agua de riego (CE_w): 1 dS.m^{-1}
- Evapotranspiración de referencia (ET_0): 4.0 mm.día^{-1}
- Jornada de riego disponible: 18 horas

La prueba de campo (ficticia) que se usa para este caso es la siguiente:

Tabla 18. Prueba de Campo utilizada en el ejemplo de aplicación

	q = 1.6 L/h		q = 2.2 L/h		q = 4.0 L/h	
t (min)	D _m	D _z	D _m	D _z	D _m	D _z
0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
15	0.06	0.02	0.07	0.04	0.09	0.06
30	0.13	0.06	0.15	0.06	0.17	0.08
45	0.19	0.09	0.22	0.09	0.25	0.11
60	0.24	0.11	0.30	0.11	0.34	0.15
75	0.30	0.13	0.37	0.14	0.42	0.17
90	0.36	0.15	0.44	0.17	0.50	0.21
105	0.42	0.16	0.51	0.20	0.59	0.24
120	0.49	0.18	0.57	0.22	0.68	0.27
135	0.55	0.21	0.64	0.25	0.77	0.30
150	0.60	0.23	0.72	0.28	0.85	0.32

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Las regresiones obtenidas son de tipo polinómico:

$$D_m \left\{ \begin{array}{ll} f_{q=1,6}(t) = 0,004t + 0,0027 & R^2 = 0,999 \quad (24) \\ f_{q=2,2}(t) = 0,0048t + 0,0055 & R^2 = 0,999 \quad (25) \\ f_{q=4,0}(t) = 0,0057t + 0,0009 & R^2 = 0,999 \quad (26) \end{array} \right.$$

$$D_z \left\{ \begin{array}{ll} f_{q=1,6}(t) = 0,0015t + 0,0105 & R^2 = 0,990 \quad (27) \\ f_{q=2,2}(t) = 0,0018t + 0,0055 & R^2 = 0,998 \quad (28) \\ f_{q=4,0}(t) = 0,0021t + 0,0168 & R^2 = 0,994 \quad (29) \end{array} \right.$$

A partir del cultivo (Tomate) se extraen las características de la planta:

Tabla 19. Características del cultivo de tomate

Tomate			
Diámetro aéreo (D _a), en m	Profundidad radicular (D _r), en m	Coefficiente de cultivo (k _c)	Conductividad eléctrica máxima del extracto saturado del suelo, en dS.m ⁻¹
0.6	0.45	1.2	2.00

6.2 Procedimiento de uso del programa (caso de aplicación)

Lo primero que debe hacer el usuario es escoger el grupo de cultivos en el que se encuentre el suyo (en este caso tomate). Los cultivos de la base de datos (tabla 4) se han organizado en los grupos que se muestran en la figura 19. A continuación se muestra, paso a paso, cómo funciona el programa a nivel de usuario y qué resultados da para el caso descrito previamente.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

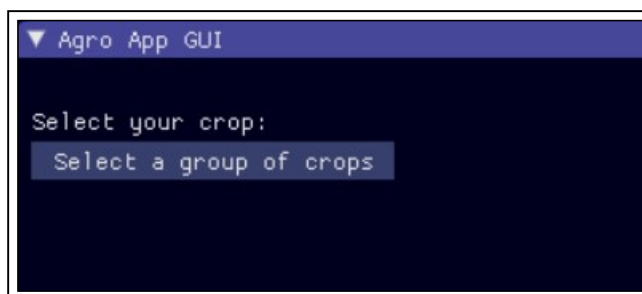


Figura 18. **Fase 1** del programa.

Cuando se hace clic en el botón “Select a group of crops”, se abre la lista de grupos (figura 19)

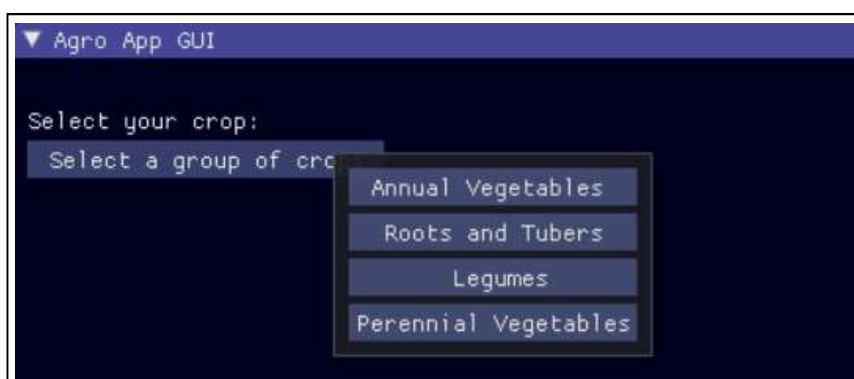


Figura 19. **Fase 1.1:** Selección del grupo de cultivos.



Figura 20. **Fase 1.2**

Cuando se hace clic en el botón “Plants from group...” se abre la lista de plantas incluidas en ese grupo. El tomate pertenece al grupo “Annual Vegetables” (cultivos anuales). Se deberá clicar entonces en el botón “Tomato” (figura 21) para proseguir.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.



Figura 21. Fase 1.3: Selección del cultivo deseado

Una vez seleccionado el cultivo, aparecerán las características de este y, simultáneamente, aparecerán diversas casillas en las que se deberán introducir una parte de los datos de entrada (figura 22).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

▼ Agri App GUI

Select your crop:

Crop selected: Tomato
 Crop Coefficient : 1.200
 Root Depth (m): 0.450
 Aerial Diameter (m): 0.600
 Maximum electrical conductivity of the saturated soil extract (mmhos/cm or dS/m): 2.000

Introduce the width of your plot (in m):

Introduce the length of your plot (in m):

Introduce the slope of your plot (in %):

(Optional) In case you know the aerial diameter of your crop with precision, introduce it here (in m) :

(Optional) In case you know the root depth of your crop with precision, introduce it here (in m) :

Indicate plot's slope direction:

 At the moment slope is equal to 0.

Figura 22. **Fase 1.4:** Primera adquisición de datos.

Cuando se han introducido todos los valores, se deberá clicar en el botón “Continue” para pasar a la siguiente página.

En la figura 22 se muestra la segunda adquisición de datos. Como se mencionó al principio, el intervalo de riego máximo entre riegos puede ser modificado por el usuario, al igual que el diámetro aéreo y la profundidad radicular del cultivo (figura 21).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

The screenshot displays the 'Agro App GUI' interface. It features a dark blue background with white text and input fields. The interface is divided into several sections for data entry:

- Soil Selection:** 'Select the type of soil from this list that fits more with yours:' with a button labeled 'Medium'.
- Climate Selection:** 'Select the type of climate that is closer to yours:' with a button labeled 'Arid'.
- Crop Selection:** 'Select the crop from this list that is closer to the crop surrounding your plot:' with a button labeled 'Grass'.
- Water/Electricity Time:** 'Introduce your daily available time to use water and/or electricity (in hours):' with a text input field containing '18' and minus/plus buttons.
- Plant Separation:** 'Introduce plants separation that you wish for your crop (in m):' with a text input field containing '0.650000'.
- Line Separation:** 'Introduce lines separation that you wish for your crop (in m):' with a text input field containing '0.850000'.
- Average ET0:** 'Introduce the average ET0 (in summer) of the past 5 years, at least (in mm/day):' with a text input field containing '4.000000'.
- Electrical Conductivity:** 'Introduce the electrical conductivity of your irrigation water (in mmhos/cm or dS/m):' with a text input field containing '1.000000'.
- Irrigation Interval:** '(Optional) Introduce the maximum irrigation interval that you wish (by default, 2.5days):' with a text input field containing '2.500000'.

At the bottom, there are two buttons: 'Continue' on the left and 'Go Back' on the right.

Figura 23. Fase 2: Segunda adquisición de datos.

Una vez se ha completado la segunda fase (figura 23), se procede a introducir todos los datos de la prueba de campo tal y como se muestra en la figura 24:

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

The screenshot shows the 'Agro App GUI' interface. It has a dark blue background with white text and input fields. The 'Field Trial Data' section contains two input fields: 'Introduce the number of different flows that you tested:' with the value '3', and 'Introduce the number of measures for each tested flow:' with the value '11'. Below these is a section for 'Introduce current flow:' with a value of '1.600000'. Underneath, there's a section for 'Introduce all your data points for this flow:' with three input fields: '150' (labeled 'Time (min)'), '0.860000' (labeled 'Wet Diameter (m)'), and '0.670000' (labeled 'Wet Depth (m)'). There are 'Add Data Point' and 'Proceed to introduce next DataSet' buttons. At the bottom, there are 'Continue' and 'Go Back' buttons. The status bar at the bottom shows 'Data Points added for the current Data Set: 11' and 'Total Data Sets added: 1'.

Figura 24. **Fase 3.1:** Inserción de los datos obtenidos con el primer caudal de la prueba de campo ($q = 1.6 \text{ L.h}^{-1}$).

Para introducir los datos, es necesario especificar cuantos caudales se han usado en la prueba de campo y cuantos datos se han cogido para cada uno de ellos (3 y 11 en este caso, respectivamente). Para introducir un conjunto de datos, se debe introducir el valor del caudal correspondiente e introducir los datos (uno a uno). Cada vez que se introduce un valor de tiempo de riego (en minutos), un diámetro mojado (en metros) y una profundidad radicular (en metros), es necesario clicar en el botón “Add Data Point” para que este quede registrado. Cuando el número de datos introducidos para ese caudal es igual al número de datos especificado al inicio, se puede clicar en el botón “Proceed to introduce next DataSet” para registrar el conjunto de datos introducido y pasar al siguiente caudal de la prueba de campo.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Agro App GUI

Field Trial Data:

Introduce the number of different flows that you tested:
3

Introduce the number of measures for each tested flow:
11

Introduce current flow:
2.200000

Introduce all your data points for this flow:

Time (min)	Wet Diameter (m)	Wet Depth (m)
150	0.950000	0.78

Add Data Point

Data Points added for the current Data Set:
11

Proceed to introduce next DataSet

Total Data Sets added:
2

Continue Go Back

Figura 25. **Fase 3.2:** Inserción de los datos obtenidos con el segundo caudal de la prueba de campo ($q = 2.2 \text{ L.h}^{-1}$).

Agro App GUI

Field Trial Data:

Introduce the number of different flows that you tested:
3

Introduce the number of measures for each tested flow:
11

Introduce current flow:
4.000000

Introduce all your data points for this flow:

Time (min)	Wet Diameter (m)	Wet Depth (m)
150	1.140000	1.05

Add Data Point

Data Points added for the current Data Set:
11

Proceed to introduce next DataSet

Total Data Sets added:
3

Continue Go Back

Figura 26. **Fase 3.3:** Inserción de los datos obtenidos con el tercer caudal de la prueba de campo ($q = 4.0 \text{ L.h}^{-1}$).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Una vez se han introducido todos los datos de la prueba de campo, se pasa a la fase 4, que viene a ser el algoritmo de cálculo y de diseño del programa. Para empezar los cálculos se debe clicar en el botón “Start Calculations” (figura 27)

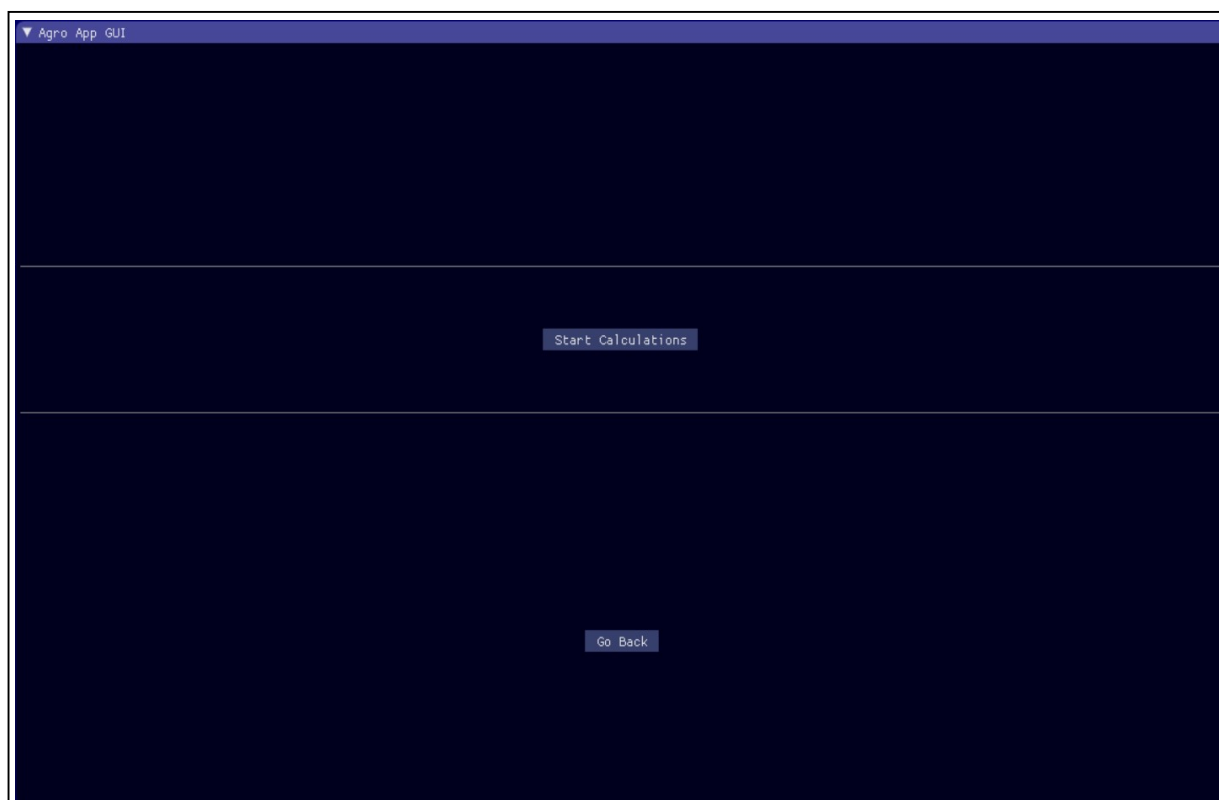


Figura 27. **Fase 4:** Cálculo y diseño de modelos

El proceso de cálculos suele durar entre 10 segundos y 2 minutos, dependiendo de la cantidad de modelos que se construyan (es decir, dependiendo del cultivo y de los demás datos de entrada, así como de la base de datos).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Cuando el programa termina todos los cálculos, se presentan los grupos que contienen los modelos finales (figura 28). En este caso, se obtienen modelos con longitudes del lateral de: 300m, 350m y 400m (tres grupos).

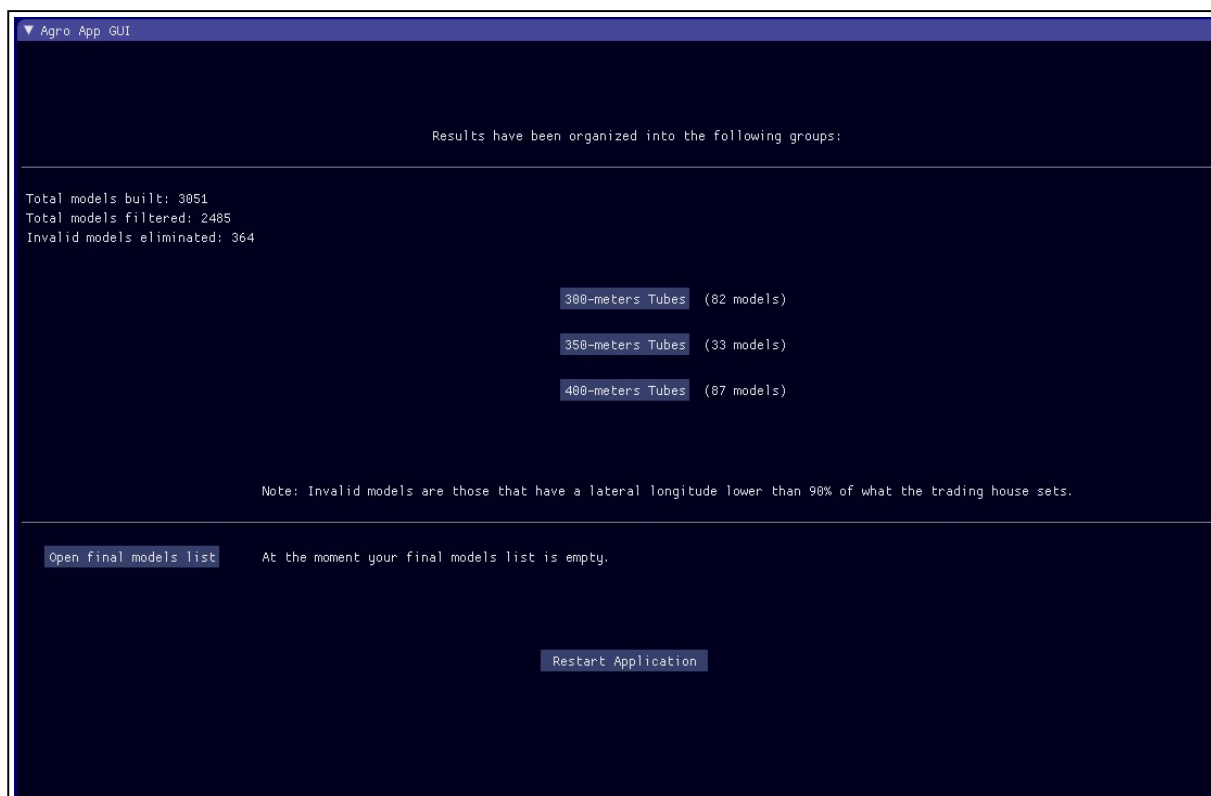


Figura 28. **Fase 5.1:** Visualización de los grupos de modelos obtenidos.

Como se puede observar en la figura 28, se muestra el número total de modelos construidos durante la fase 4 (en este caso, 3051 modelos). Los modelos inválidos eliminados (364) son todos aquellos que tienen una longitud del lateral inferior al 90% de la establecida por el fabricante. Los modelos filtrados (2485) son todos aquellos que han sido descartados, siguiendo la lógica expuesta en el apartado 7.9 (Organización y Filtración de modelos).

El botón “Open final models list” sirve para acceder a la lista final de modelos, que tendrá que ser elaborada por el usuario. Así, cuando el usuario visualice el modelo de uno de los grupos aquí presentados, podrá decidir añadirlo a su lista final. Como se puede observar en la figura 28, al principio la lista está vacía y por tanto clicar el botón no serviría de nada.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

En la figura 29 se muestran las herramientas de organización proporcionadas por el programa. Como se puede observar, el grupo elegido (en este caso el grupo con tuberías laterales de 300 metros) se puede organizar en función de cuatro parámetros: longitud de la terciaria, coste unitario, intervalo entre riegos y tiempo de riego. La organización según un parámetro puede hacerse orden ascendente o descendente. Para invertir el criterio de organización se dispone del botón “Switch Order”.

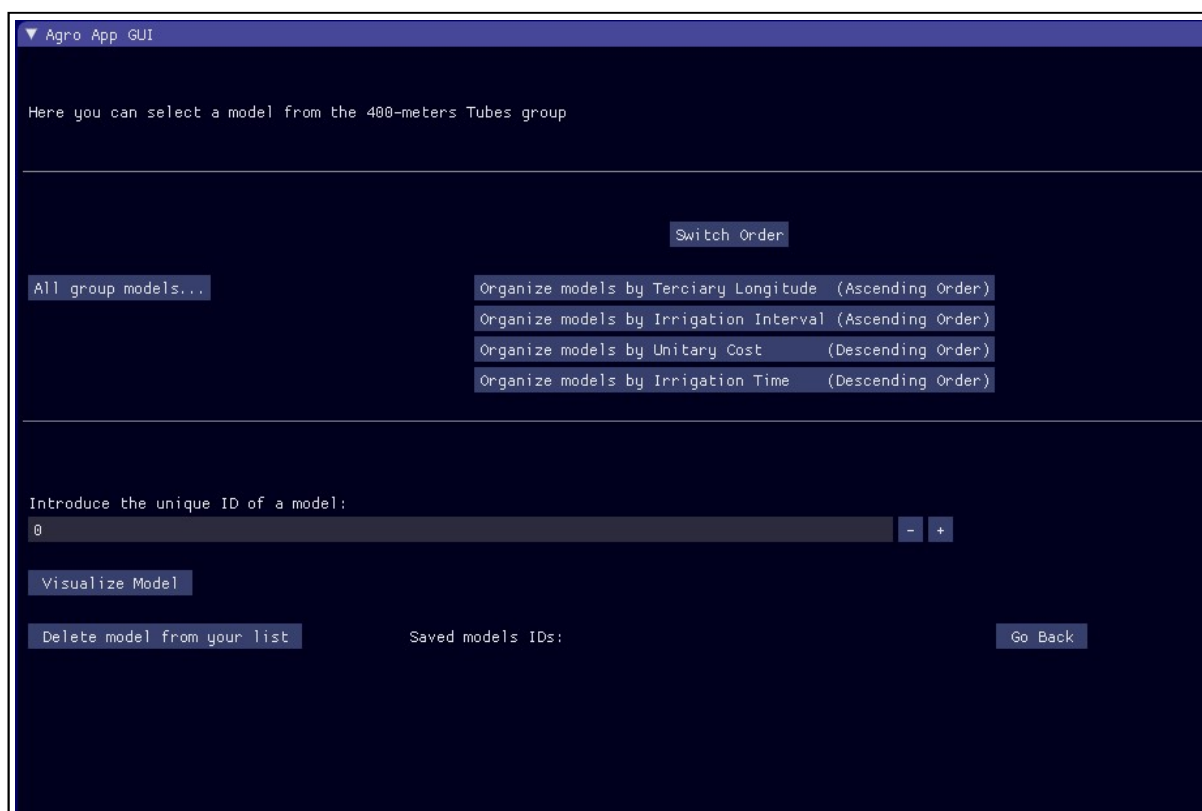


Figura 29. **Fase 5.2:** Herramientas de organización para los modelos de un grupo dado

Si se introduce el identificador único de un modelo (“model unique ID”) y se clicla en el botón de “Visualize Model”, se accederá directamente a ese modelo, siempre y cuando esté dentro del grupo en cuestión. Para conocer el identificador único de un modelo debe visualizarse primero, como se muestra más adelante, en la figura 31.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Una vez se han ordenado los modelos del grupo según uno de los parámetros (en este caso, por intervalo entre riegos, en orden ascendente), se procede a seleccionar un modelo para su posterior visualización.

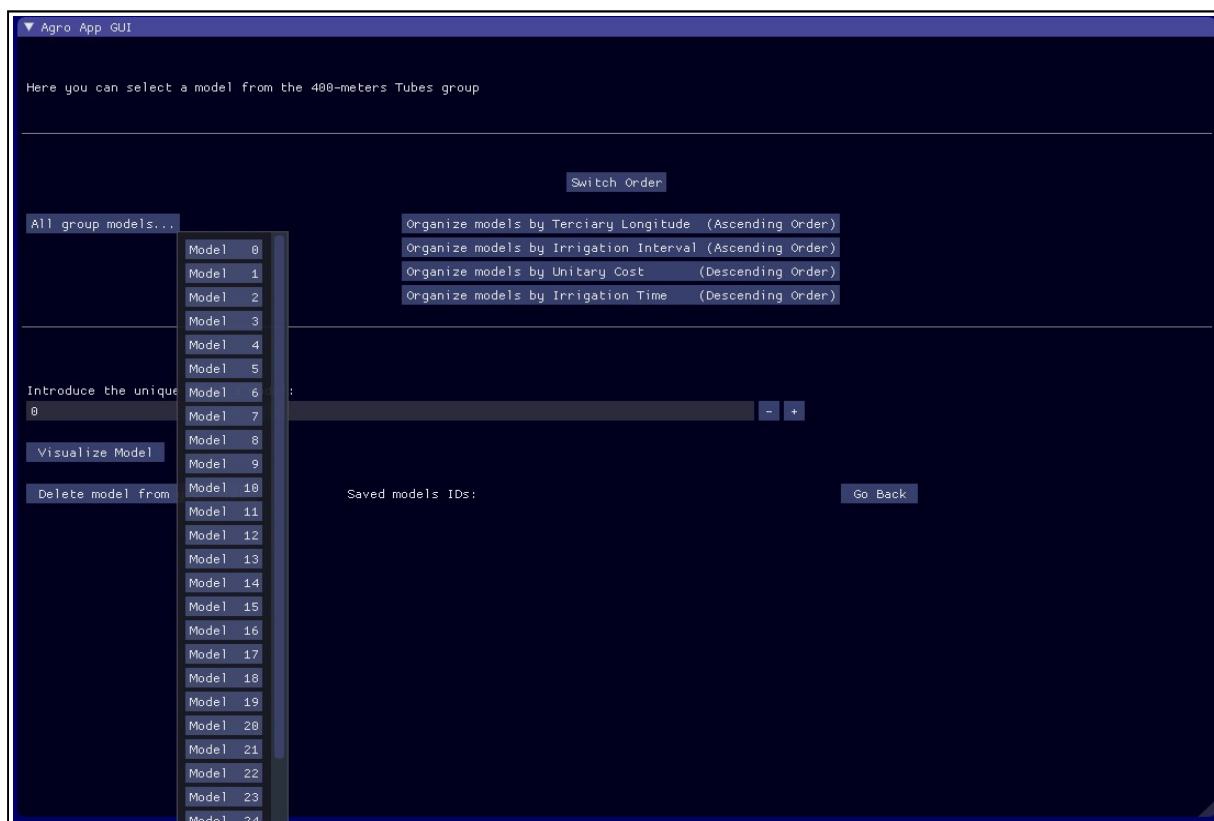


Figura 30. Fase 5.3: Elección de un modelo para su visualización

Una vez se clicca en uno de los modelos de la lista, se pasará a la siguiente fase que es la visualización del modelo.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Cuando se procede a visualizar un modelo, aparece toda la información esencial de este (figura 31). En primer lugar, se proporciona su posición dentro de la lista, que cambiará en función de cómo esté ordenada ("Current model number in its group:"). El segundo número de identificación ("Model unique ID") corresponde al número de identificación del modelo dentro del total de modelos construidos (incluidos los que han sido eliminados y filtrados). Este número de identificación es único y sirve para recordar un modelo en particular.

Agri App GUI

Current model number in its group: 0

Model unique ID: 384

MODEL CHARACTERISTICS

Lateral Tube Properties		Tertiary Tube Properties	
Lateral longitude (m):	371.00	Tertiary longitude (m):	42.50
Drips separation (m):	1.00	Lateral separation (m):	0.85
Drips flow (L/h):	1.60	Total flow (L/h):	29680.00
Total flow (L/h):	593.60	Internal Diameter (mm):	64.00
Internal Diameter (mm):	13.90	External Diameter (mm):	75.00
External Diameter (mm):	15.90	Initial pressure (mca):	27.60
Average initial pressure (mca):	24.91	Total number of laterals:	50

Subunit design, General Properties	
Wet area percent (%):	95.76
Irrigation interval (days):	1.00
Irrigation time (min):	281
Wet diameter (m):	1.13
Wet depth (m):	0.43
Working Pressure (mca):	27.60
Max. number of sectors:	3.00
Min. Pump flow (L/h):	31372.55
Model estimated cost (euros/m2):	1.19

Save model ID

Add model to your final models list

Previous Model Next Model

Go Back

Figura 31. **Fase 5.4:** Visualización de las características principales del modelo

Se pueden visualizar todos los modelos del mismo grupo sin tener que volver hacia atrás, usando los botones "Previous Model" y "Next Model". Como se puede observar, hay un botón ("Save model ID") que sirve para guardar el número de identificación único del modelo (figura 31) y así poder volver a él de manera más rápida (figura 29). Hay otro botón ("Add model to your final models list") que sirve para guardar el modelo en una lista a parte (haciendo una copia de éste).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Una vez dentro de la lista final de modelos, se podrán eliminar o modificar, como se verá más adelante (figura 32).

Cuando se ha guardado al menos un modelo en la lista final de modelos, se podrá clicar el botón “Open final models list” (figura 28). De esta manera se dará paso a la siguiente fase (nótese que siempre se puede volver hacia atrás y/o reiniciar el programa):

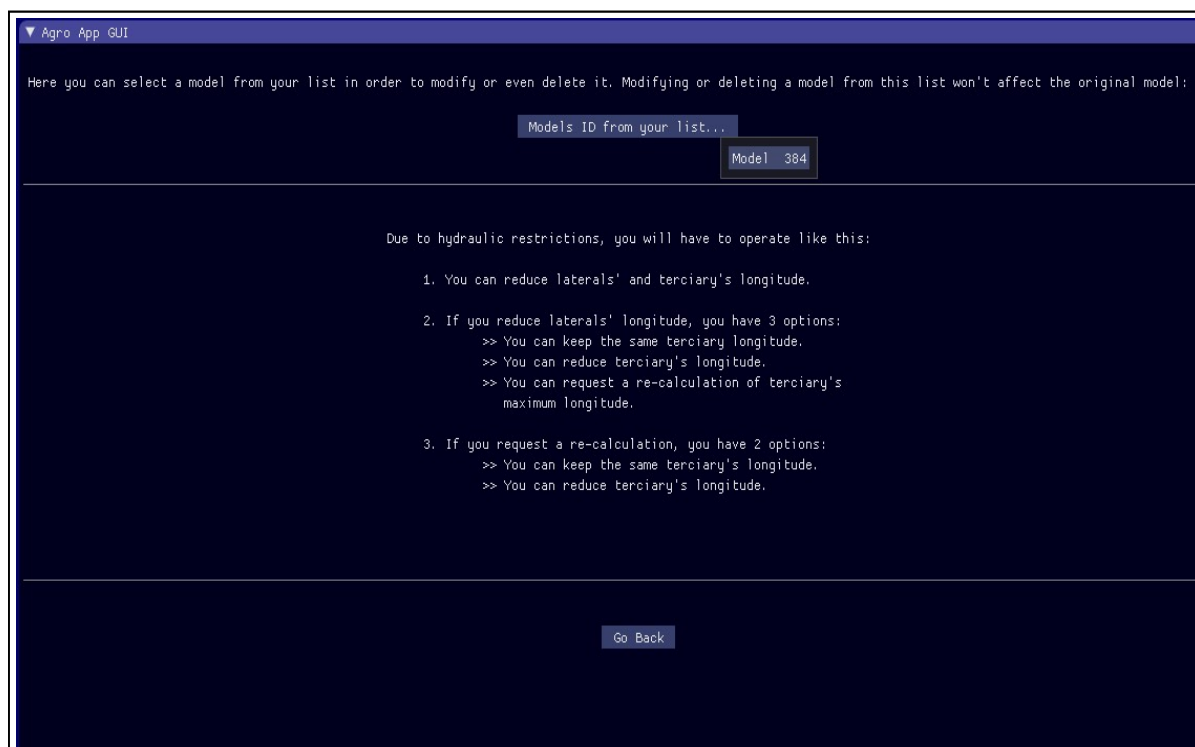


Figura 32. Fase 6.1: Elección de un modelo para su re-ajuste.

Como se puede observar en la figura 32, en esta fase se da la opción de retocar el modelo, siguiendo las pautas explicadas en la misma figura: sólo se puede reducir la longitud del lateral y de la terciaria. Si se reduce la longitud del lateral, entonces se podrá recalcular la longitud máxima de la tubería, como se verá en la figura 33. En este caso solo se ha seleccionado un modelo, el mismo que se muestra en la figura 31, cuyo número de identificación único es el 384. Cuando se selecciona un modelo de la lista, en este caso el nº384, se pasa a la siguiente fase que trata de retocar el modelo según convenga más al usuario.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Agro App GUI

Introduce a new lateral longitude:
 Current max. longitude: 371.000000 m
 Apply

Introduce a new tertiary longitude:
 Current max. longitude: 42.500000 m
 Apply

Re-calculate tertiary longitude Reset original values

Visualize model

Delete model from your list Go Back

Note: If you go back the current values will be saved.

Figura 33. **Fase 6.2:** Ajuste de la longitud del lateral.

Agro App GUI

Introduce a new lateral longitude:
 Current max. longitude: 371.000000 m
 Apply

Introduce a new tertiary longitude:
 Current max. longitude: 62.900002 m
 Apply

Reset original values

Visualize model

Delete model from your list Go Back

Note: If you go back the current values will be saved.

Figura 34. **Fase 6.3:** Restablecimiento de la longitud máxima de la terciaria y ajuste de su longitud.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

En la figura 33 se puede observar que se ha reducido la longitud del lateral a 250m, con tal de que la longitud de la subunidad sea un múltiplo de la longitud de la parcela (500m). Una vez reducida su longitud, se recalcula la longitud máxima de la terciaria, pasando de 42.5m a 62.9m (figura 34). En la figura 34 se puede observar que también se acaba reduciendo la longitud de la terciaria a 50m para que sea múltiplo de la anchura de la parcela (100m).

Cuando se modifica la longitud de la terciaria o la de los laterales, varios parámetros cambian (caudal, pérdidas de carga y presión de trabajo). Como se verá en la siguiente figura (figura 35), cuando se proceda a visualizar un modelo modificado, todos esos parámetros habrán cambiado.

Siempre que se desee, se podrá restablecer los valores originales del modelo, mediante el botón "Reset original values" así como eliminar el modelo de la lista (figura 34).



Figura 35. **Fase 6.4:** Visualización de un modelo después de su modificación.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

La fase 6.4 (figura 35) es la última fase del programa. La idea es que el usuario escoja todos los modelos que le parezcan más adecuados, incluyéndolos en la lista final. Así, podrá compararlos, modificarlos y seleccionar los “definitivos”. Aunque se llegue a esta fase, se puede ir hacia atrás (hacia fases anteriores) para incluir más modelos o eliminar alguno de la lista, así como modificar o restablecer los valores de otros modelos.

7. ANÁLISIS DEL FUNCIONAMIENTO DEL SOFTWARE

Como se ha comentado a lo largo del programa, existen varias limitaciones en cuanto al alcance de este. A modo de recopilación se exponen todas las características que limitan su funcionamiento:

- (1) Cultivos hortícolas.
- (2) Parcelas rectangulares.
- (3) Pendiente uniforme.
- (4) Cálculo con emisores autocompensantes.
- (5) Longitud de las tuberías laterales y separación entre emisores impuestas por el fabricante.
- (6) Marcos de plantación en los que la separación entre plantas de la misma línea sea pequeña (tal como se establece en la casuística general con relación a la distribución de las plantas).

Los puntos (1), (2), (3) y (4) tienen solución, ya que el cálculo y diseño de subunidades es ampliable a cultivos frutícolas y otros, así como a parcelas no-rectangulares y con pendientes irregulares.

En cuanto al marco de plantación, se ha observado, durante el desarrollo del software, que influye mucho sobre el número y el tipo de modelos calculados:

- Los marcos de plantación muy amplios, junto al punto (5), hacen que la única solución posible sea tener un solo emisor de riego por planta. Esto lleva a diseños inviables, puesto que con un solo emisor se debería aportar toda el agua necesaria para la planta, lo que llevaría a tiempos de riego muy altos y probablemente a pérdidas de agua por percolación, así como a diámetros mojados más grandes de lo establecido para estos casos.
- Variar el marco de plantación (dentro de la casuística contemplada por el programa), para un mismo cultivo y parcela, permite obtener diseños muy diferentes. Así, este programa puede servir para determinar el marco de plantación “óptimo” en una situación determinada, siempre

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

que se afine en las características de los cultivos (sobre todo en el diámetro aéreo de los mismos).

También se ha podido observar que, a veces, la longitud de los laterales proporcionada y fijada por el fabricante es demasiado elevada para que se cumplan las restricciones hidráulicas (velocidad máxima del agua y/o presión máxima, al inicio del lateral). Ello se podría explicar por varias razones, que no se han podido comprobar por el momento:

- Que las casas comerciales, en algunos casos, no se adapten a la normativa española y por tanto sigan restricciones más suaves en cuanto a presión y velocidad máxima en la tubería.
- Que el método de cálculo empleado para las pérdidas de carga no sea exactamente el mismo y, con las longitudes que se dan (de hasta 500m), tenga un efecto significativo en el resultado.
- Que las casas comerciales no tengan en cuenta pendientes de hasta el 2%, al menos, en el cálculo de las longitudes máximas.

Sin embargo hay que decir que, en algunos casos, las casas comerciales tienen la misma versión de tubería (el mismo modelo) pero con distinta longitud, teniendo entonces tuberías que respetan las normas UNE.

Un punto importante que quizás no se ha resaltado lo suficiente es que sin una prueba de campo el programa no funciona. Esto se debe a que, sin conocer la velocidad de infiltración del agua en el suelo, no es posible predecir con fiabilidad la profundidad que alcanzaría el agua si regáramos durante un tiempo determinado. Una mejora sustancial para este programa sería la incorporación de modelos matemáticos que describan, con cierta precisión, la infiltración del agua en el suelo en función del caudal arrojado, el tiempo de riego y sobretodo, en función de las características del suelo (densidad aparente, textura, estratificación...).

8. PREVISIÓN DE FUTURO DEL SOFTWARE

8.1 Futuras implementaciones

Actualmente, las nuevas tecnologías tienen cada vez más presencia en el sector agrícola dado que facilitan mucho la toma de decisiones y las tareas de campo. Es por ello que se pretende que el software incorpore las siguientes funcionalidades:

- Conexión con la API (Application Programming Interface) del Catastro, o con la de Google Earth, para tener acceso a la topografía de una parcela según sus coordenadas o bien según el sistema de clasificación del Catastro. De esta manera se podrían obtener las curvas de nivel del terreno y realizar el diseño con pendientes irregulares.
- Conexión con la red de estaciones agroclimáticas (también vía API) para obtener el valor de ET_0 de forma automática. El valor de ET_0 sirve para el diseño de la instalación pero posteriormente sirve para la planificación del riego (dado que el valor de ET_0 varía a lo largo del año).

A largo plazo, este software pretende ampliar sus funcionalidades. A continuación se exponen diversas mejoras que podrían implementarse en un futuro:

- Diseño completo de la instalación de riego (desde la bomba hasta los emisores de riego). A partir de los datos obtenidos de la API del Catastro, o de Google Earth, se pueden obtener los datos topográficos de la parcela y del entorno, lo que permite realizar el diseño completo de la instalación.
- Diseño de instalaciones de riego localizado para los demás cultivos (frutícolas y cereales, principalmente).
- Incorporación de modelos matemáticos que describan la infiltración del agua en el suelo en función del caudal arrojado, del tiempo de riego y del tipo de suelo. Esto vendría a ser una alternativa a la prueba de campo, es decir una opción adicional.

8.2 Difusión del software

Por ahora el código del software no está publicado en ningún repositorio (como GitHub), ya que todavía se encuentra en su fase inicial de desarrollo. Una vez se tenga una primera versión estable (sin fallos) y más completa, se publicará en un repositorio. Este software pretende ser

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Open-Source, es decir, de libre acceso, siempre y cuando el mantenimiento de posibles servidores sea viable.

8. CONCLUSIÓN

Después de haber mostrado los resultados en el caso de aplicación y habiendo analizado el funcionamiento del software, se puede decir que, a pesar de haber algunos errores, el software funciona correctamente y elabora lo esperado. El programa es capaz de elaborar diseños que cumplen con la normativa y que respetan las restricciones agronómicas (porcentaje de suelo mojado, necesidades hídricas del cultivo, solapamientos y tamaño del bulbo húmedo, tiempo de riego...). La elección del “mejor” modelo (o de varios) la realizará siempre el usuario, pudiendo comparar los diferentes diseños, así como modificar los parámetros de entrada (como el marco de plantación) para buscar la situación más favorable. De esta manera se pretende que el esfuerzo dedicado por parte del usuario se centre en comparar los diferentes modelos elaborados y finalmente seleccionar el más adecuado (o los más adecuados).

Este software se encuentra en su fase inicial de desarrollo y es obvio que puede mejorarse en muchos aspectos. Con esta primera versión se pretende demostrar que es posible automatizar por completo el diseño de instalaciones de riego, minimizando el uso del agua y de materiales plásticos.

El programa ha demostrado que facilita y, por ende, puede incentivar la implementación del riego localizado por parte de los agricultores que a día de hoy siguen usando el sistema de riego tradicional (por gravedad).

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

9. BIBLIOGRAFÍA

- Arviza, J. 1996. *Riego Localizado*, Universidad Politècnica de València (UPV).
- Allen R. G., Pereira L.S., Raes D. and Smith M., 1998. *FAO Irrigation and drainage Paper nº56 – Crop Evapotranspiration*.
- Barton J.J., Nackman L.R., 1994. *Scientific and Engineering C++: an introduction with advanced techniques and examples*.
- Brouwer C., Prins K., 1989. *FAO Irrigation Water Management: Irrigation Scheduling*.
- Cornut O., *Dear ImGui: Bloat-free Immediate Mode Graphical User Interface for C++ with minimal dependencies*, www.github.com/ocornut/imgui (sin fecha disponible).
- Doorenbos J. and Pruitt W.O., 1977. *FAO Irrigation and drainage Paper nº24*.
- Goldberg D., Gornat B., Rimon D., 1976. *Drip irrigation. Principles, design and agricultural practices*.
- INE, 2017. *Encuesta sobre el uso del agua en el sector agrario*.
- Keller J., Bliesner R.D, 1990. *Sprinkle and Trickle Irrigation*.
- Knoblauch J., Sethuraman A., 2016. *ImGui – A Desktop GUI Application for Isolation with Migration Analysis*.
- MAPAMA, 2017. *Encuesta sobre superficies y rendimientos de cultivos*.
- Stroustrup B., 2013. *A Tour of C++*.
- Stroustrup B., 2014. *Programming: principles and practice using C++*.
- Tarjuelo J.M., 1995. *El riego por aspersión y su tecnología*.
- UNE, 2014. *Norma UNE 53367: Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua para microrriego*.
- UNE, 2017. *Norma UNE-EN 12201-2:2012 + A1: Sistemas de canalización en materiales plásticos para conducción de agua y saneamiento a presión*.
- Valverde A.L., 1998. *El riego: Fundamentos hidráulicos*.
- Villalobos F.J., Mateos L., Orgaz F., Fereres E., 2009. *Fitotecnia: Bases y tecnologías de la producción agrícola*.

Automatización del cálculo y el diseño de subunidades de riego localizado en cultivos hortícolas y parcelas rectangulares.

Weiss M.A., 2012. *Data structures and algorithm analysis in C++*.

AZUD, 2017. <http://www.azud.com/riego/Productos/Listado.aspx?FrmGama=1&FrmSubGama=1>.

CEPEX, 2015. <https://www.cepexirrigation.com/productos/micro-riego/tuberia-de-goteo/>.

CYPE Ingenieros, 2012. Precio lineal de los tubos de polietileno en España, [www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/instalaciones/Urbanas/Redes de agua potable/Tubo de polietileno.html](http://www.generadordeprecios.info/espacios_urbanos/instalaciones/Urbanas/Redes_de_agua_potable/Tubo_de_polietileno.html).

NaanDanJain, 2012. <http://es.naandanjain.com/products/drip-Irrigation/PC-Driplines/>.

RainBird, 2017. <https://www.rainbird.es/productos/tuberias-con-goteros-accesorios-de-conexion-y-distribucion>.